

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный университет
им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»
(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)**

На правах рукописи



КУДРЯВЦЕВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.19.02 – Технология и первичная обработка текстильных
материалов и сырья

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юхин Сергей Семенович

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	8
1.1. Воздухопроницаемость и пористость как факторы уровня гигиенических свойств ткани.....	8
1.2 Исследование пористости и размеров пор: методы и приборы.....	9
1.3 Краткий обзор работ, посвященных воздухопроницаемости и пористости тканей.....	13
1.4 Обзор работ, посвященных ранним идеям автоматизации проектирования тканей с учетом заданных свойств.....	21
1.5 Обзор работ, посвященных вопросам моделирования и визуализации тканых структур.....	23
1.6 Исследования влияния применения аддитивных технологий на свойства тканей.....	26
1.7 Математическая модель научно-исследовательской деятельности в текстильной промышленности.....	27
Выводы по первой главе.....	31
ГЛАВА 2. СРЕДА ОБЪЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОТИПА. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МАТЕРИАЛИЗАЦИИ ТКАНЫХ СТРУКТУР.....	32
2.1 Программное обеспечение, инструменты, фигуры и функции для проектирования тканых структур.....	32
2.2 Проблемы применения логических операций в среде 3Ds MAX. Ретопология трехмерной компьютерной модели.....	35
2.3 Прототипирование и аддитивные технологии.....	39
Выводы по второй главе.....	42

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТКАНЫХ СТРУКТУР	43
3.1 Порядок проектирования ткацкого переплетения в среде 3Ds MAX.....	43
3.2 Порядок получения тканой пористой структуры	54
3.3 Объемы пор тканых структур и аддитивная печать образца	65
3.4 Сравнение объемов пористых структур при равных условиях.....	75
Выводы по третьей главе.....	78
Заключение	79
Список литературы	80
Приложение А Результаты рендеров переплетений.....	92
Приложение Б Результаты рендеров пористых структур тканых переплетений ...	95
Приложение В Расчет объемов пористых структур при равных условиях (на примере полотняного переплетения)	98
Приложение Г Диаграммное представление метода получения тканых структур	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

В условиях жесткой конкуренции необходимо оперативно осуществлять проектирование текстильных полотен в соответствии с разнообразными требованиями к набору их характеристик, меняющихся в зависимости от спроса и тенденций моды. Внедрение в процесс проектирования цифровых методов позволяет в короткие сроки решить задачу получения полотен с заданными свойствами.

Современные экономические условия с тенденцией все большего снижения показателей материалоемкости тканей ставят задачу эффективного проектирования текстильных полотен с заданными гигиеническими свойствами. Являясь частью ресурсосберегающих технологий, цифровые методы проектирования способны давать положительный экономический эффект.

Воздухопроницаемость – важнейший гигиенический показатель ткани, исследованию которого посвящено значительное число работ. Однако ни в одной из них пористая структура ткани не исследуется как самостоятельный материальный объект, а вычисления с помощью предложенных формул дают варьирующиеся значения. Получение точных показателей объема пористой структуры и геометрии пор позволяют подойти к вопросу проектирования и контроля воздухопроницаемости текстильных полотен. Поэтому **актуальность темы** заключается в том, что предлагаемый метод проектирования тканых структур позволяет точно и детально изучить характеристики поры по всем параметрам, доступным материальному объекту, имеющего возможности вариативной настройки его габаритов.

Объект исследования – текстильное полотно и его цифровая модель.

Предмет исследования – метод цифрового моделирования тканых пористых структур.

Цель работы заключается в разработке метода проектирования тканых структур и материализации пористых пространств с помощью цифровых технологий.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **задачи**:

- 1) проведен анализ существующих инструментов и подходов проектирования пористых структур;
- 2) на основе использования понятия цифрового двойника текстильной структуры разработан метод формирования объёмных структур текстильного полотна;
- 3) изучены структуры тканей как трехмерные модели с использованием методов компьютерного моделирования.

Методы и технические средства исследования решения задач.

Методы исследования, выбранные для выполнения поставленных цели и задач, основаны на системных и концептуальных общенаучных подходах, структурном программном анализе данных.

В ходе исследований применены основные законы теории ткацких переплетений, основы механической технологии текстильных материалов и теории строения ткани, математической логики, положения оптимизации цифровых структур, а также алгоритмизации. В ходе решения задач исследования использованы методы компьютерного моделирования сплайнов и структурных сеток, прототипирования и визуализации объектов цифрового пространства, аддитивный метод трехмерной печати.

Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и производственных условиях с использованием современных средств проектирования объектов цифрового пространства.

В работе использованы следующие программные продукты: Windows Microsof Word и Excel, программный инструмент визуального моделирования с открытым исходным кодом StarUML, прикладные графические программы трехмерного моделирования Autodesk 3D Max и Blender, программное

обеспечение для трехмерного NURBS-моделирования и визуализации цифровых моделей Rhinoceros 3D.

Соответствие паспорту специальности.

Работа выполнялась в рамках Паспорта специальности 05.19.02 – Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья и советуется его следующим пунктам:

5. Методы проектирования технологических процессов и текстильных материалов.
7. Методы проектирования волокон, нитей, текстильных материалов и изделий с учетом выбора его рационального строения и оптимального технологического процесса.
13. Моделирование технологических процессов получения текстильных волокон, нитей, полотен и изделий.

Результат работы, составляющий **научную новизну**: разработан метод проектирования пористых структур тканых переплетений с собственной геометрией каркаса и доступом к программному анализу геометрических свойств трехмерных моделей тканей.

Теоретическая значимость работы заключается в получении цифровых эталонных моделей пористых структур тканей различных переплетений с детализацией геометрии формы, а также с собственной геометрией каркаса и доступом к программному анализу свойств.

Практическая значимость работы: разработка эталонной модели для проектирования реальных текстильных полотен из различных видов пряжи и нитей и варьируемыми заправочными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) разработанный цифровой метод проектирования тканых структур;
- 2) разработанный цифровой метод получения пористых структур тканей и их характеристик.

Апробация и реализация результатов работы.

Основные результаты научной работы докладывались и получили положительную оценку:

- на XII международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки» в 2019 г.;
- на международном Косыгинском форуме – 2019 «Современные задачи инженерных наук»;
- на отчетном выступлении по итогам работ в рамках гранта «Идея» ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина в 2019 г.;
- на заседаниях кафедры проектирования и художественного оформления текстильных изделий ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина в 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав и общих выводов. Работа выполнена на 99 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 100 наименований, 4 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1. Воздухопроницаемость и пористость как факторы уровня гигиенических свойств ткани

Формирование искусственного оптимального климата для нормального тепло- и газообмена человека и окружающей среды с учетом географических, бытовых и профессиональных условий лежит в основе физиологических и гигиенических требований к тканям. Опираясь на исследования [2, 4, 9, 12, 31, 50, 67, 70, 75, 89, 90, 91], можно определить воздухопроницаемость тканей как одно из важнейших свойств, определяющих её гигиенический уровень.

Воздухопроницаемость определяет вентиляцию пододежного пространства, конвекционную отдачу тепла, тепло- и влагозащитные свойства. Воздухопроницаемость можно контролировать на этапе проектирования с помощью характеристик сырья (типа волокон и соотношения смесей), геометрических характеристик используемых нитей, структурных параметров тканей, технологий, используемых для производства ткани. Большинство указанных факторов влияния на воздухопроницаемость так или иначе связаны с пористостью. Общая пористость выражается в процентной доле, включающей все промежутки между волокнами, нитями и пространства внутри них [28].

Геометрия пористой структуры ткани напрямую зависит от взаиморасположения нитей основы и утка. Сложную структуру пористого пространства нельзя оформить и изучить в материальном мире как точную модель. Поэтому воздухопроницаемость определяется с помощью приборов и характеризуется количеством воздуха, который при определенном давлении движется сквозь поверхность за четко установленную единицу времени (49 Па – 5 мм в.ст.) [61]. Для определения воздухопроницаемости используют такие приборы как, например, FF-12, типа Шоппер, УПВ-2, системы Архангельского, АТЛ-конструкции Венгерского текстильного института, ВПТМ-2, FX 3300

LabAir, Shirley Airpermeameter. Создание условий для перепада давления с двух сторон ткани, через которую проходит воздух, а также регистрация разницы перепада давления и расхода воздуха лежат в основе принципа работы перечисленных приборов.

Перечисленные выше приборы имеют отличия в способе создания разряжения воздуха под образцом. Например, в приборе Шоппера разрежение достигается за счет слива воды из сосуда, который соединён с камерой, которую закрывает ткань, а в некоторых других приборах – за счет вентилятора. Существенный недостаток имеющихся методик определения воздухопроницаемости заключается в том, что направленность потока воздуха в ходе лабораторного испытания и в ходе реального использования в условиях не согласованы: перпендикулярная направленность выступает против вариативного направления потока. Поэтому существует разница в значении воздухопроницаемости тканей, полученной в ходе приборного исследования и при реальной эксплуатации ткани.

1.2 Исследование пористости и размеров пор: методы и приборы.

Пористость ткани является важной характеристикой, влияющей на потребительские свойства ткани, выражает объем незаполненный волокнистым материалом [1, 6, 65].

Международный стандарт определения воздухопроницаемости сформирован на основе документа ГОСТ Р ИСО 9237-99 [44] и предписывает определять воздухопроницаемость как скорость воздушного потока, который проходит перпендикулярно сквозь площадь образца поверхности, при зафиксированных значениях перепада давления за интервал времени. Согласно стандарту обработку результата следует вести следующим образом:

– среднее арифметическое значение результатов испытания и коэффициент вариации рассчитывают с точностью до 0,1% при доверительной вероятности $P=0,95$ [44];

– воздухопроницаемость R , мм/с, рассчитывают по формуле [44]:

$$R = \frac{q_v}{A} * 167, \quad (1.1)$$

где q_v – среднее арифметическое значение воздушного потока, $\text{дм}^3/\text{мин}$;

A – площадь образца при испытании, см^2 ;

167 – переводной коэффициент для потока воздуха.

Формула расчета воздухопроницаемости для прозрачных и нетканых материалов (R_1 , м/с), которая рекомендована в ГОСТ Р ИСО 9237-99, с тем же средним арифметическим показателем воздушного потока q_v и площадью образца «А», с учетом доверительной вероятности и точностью до 2%:

$$R_1 = \frac{q_v}{A} * 0,167. \quad (1.2)$$

Формула определения пористости на основании величины объемного удельного веса ткани предложена в работе П.Е. Калмыкова учитывает пористость (Π , %), объемный вес ткани (D), удельный вес материала ткани (d) [23]:

$$\Pi = \left(1 - \frac{D}{d}\right) * 100, \quad (1.3)$$

В работе Э.В. Кондрацкого подробно описан анализ методов определения пористости ткани и размеров её межнитевых пор [25, 26, 27]. В качестве модели текстильного полотна использованы ткани-сетки, у которых легко передать геометрию пор, приближенную к реальной. Но более сложные структуры, случаи

сплющивания нитей, учет крутки при определении геометрии пористого объекта не рассмотрены.

Среди методов определения размеров пор текстильных материалов следует указать метод пузырьков, метод, основанный на эффективности фильтрования, а также метод геометрических вероятностей.

Ряд авторов предлагает для определения размеров пор текстильных материалов применять «Метод пузырьков» [14, 59, 72, 73, 77]. Характеристику пористой среды данного метода лаконично описала С.Е. Бесхлебная, обозначив пористую среду как модель, состоящую из прямых капилляров, имеющих вариативные поперечные сечения [7]. Порядок действий метода заключается в следующем: образец ткани замачивается в спирте, фиксируется с помощью держателя, на образец наливают жидкость, снизу подается воздух, давление воздуха повышается постепенно. В момент появления пузырьков воздуха фиксируют значение минимально давления P_{MIN} , покрытие пузырьками всей поверхности исследуемого образца – момент фиксирования максимального давления P_{MAX} . Наибольший и наименьший размер пор, исходя из данных P_{MIN} и P_{MAX} , определяют по формуле с учётом давления P , гидростатического давления столба жидкости над капилляром и коэффициент натяжения жидкости (поверхностного):

$$d = \frac{4\sigma}{P-p*g*h} \quad (1.4)$$

Иной метод нахождения размеров пор обращен к эффективности фильтрования: через исследуемый образец ткани пропускаются жидкость и взвешенные в ней частицы. При этом коэффициент фильтрования находят для каждого размера частиц:

$$K_{\phi} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.5)$$

где n_1 и n_2 – количество частиц определённого размера до и после использования образца, их подсчет ведется с помощью центробежного фотоседиментографа [27].

Автор предложил формулу для определения времени, за которое частицы размером d перейдут с уровня свободной поверхности (R_0) на уровень поверхности измерения (R) с учетом динамической вязкости седиментационной жидкости (η), плотности исследуемого материала (ρ) и седиментационной жидкости (ρ_0):

$$t = \frac{18 \cdot \eta}{d^2(\rho - \rho_0) \cdot w^2} * \ln \frac{R}{R_0}, \quad (1.6)$$

Для определения количества частиц с размерами d_1 и d_2 во фракции, предложена формула, учитывающая значения фототока чистой седиментационной жидкости (J_0) и фототока при наличии частиц ($J(d)$), а также параметр ($K(d)$), учитывающий волновые эффекты и зависящий от коэффициента преломления и размера частиц:

$$\Delta n = \frac{4}{9} * \frac{R^2(\rho - \rho_0) \cdot w^2}{\eta} * \int_{t(d_1)}^{t(d_2)} \frac{\ln \frac{J_0}{J(d)}}{K(d)} * dt, \quad (1.7)$$

Определение размеров пор по эффективности отфильтровывания требует сложного оборудования, значительных временных затрат на получение и обработку экспериментальных данных.

Следующий, рассматриваемый в работе метод, – метод геометрических вероятностей. Он основан на четырех положениях [27]:

- 1) срез поры имеют форму круга, сами поры располагаются равномерно;
- 2) диаметры пор – это случайные величины;

- 3) вариативность размеров пор находят через произвольную функцию плотности вероятностей $f(x)$;
- 4) ткань мысленно рассекают кругом с диаметром D , тогда число пор будет ограничено этой окружностью (формула 1.8), а количество межнитевых пор на заданной площади образца составит N_s (формула 1.9):

$$N_1 = \frac{F \cdot D^2}{\bar{x}^2 \cdot (1 + \delta^2)}, \quad (1.8)$$

$$N_s = \frac{4 \cdot F}{\bar{x}^2 \cdot \pi \cdot (1 + \delta^2)}, \quad (1.9)$$

Формула, предложенная автором, учитывает площадь пор (F), диаметр секущей окружности (D), коэффициент вариации величин x (δ) и математическое ожидание (\bar{x})

Зная средний диаметр межнитевых пор \bar{x} (формула 1.20), на образце N_2 можно определить число пор, захватываемых секущей окружностью:

$$\bar{x} = \frac{N_2}{\pi \cdot D \cdot N_s}. \quad (1.20)$$

$$N_2 = \frac{4 \cdot F \cdot D}{\bar{x} \cdot (1 + \delta^2)} \quad (1.21)$$

Данный метод используется только для тех тканей, где все поры можно фиксировать на просвет.

1.3 Краткий обзор работ, посвященных воздухопроницаемости и пористости тканей

Обозначенной теме соответствует обширное число работ, однако вопрос достоверного строения пористого пространства для тканей различных видов переплетений в работах оставался открытым.

М. Рубнер предложил формулу, где секунды, за которые 1 см^3 воздуха проходит через 1 см^3 ткани, позволяют определить воздухопроницаемость. В его формуле учитывается давление, равное $0,42 \text{ мм}$ водяного столба [8]:

$$t_1 = \frac{t \cdot S \cdot 10}{A \cdot \sigma}, \quad (1.22)$$

где t_1 – искомое время, сек.

t – время прохождения л/сек.

S – площадь образца, см.

A – количество воздуха, см^3

σ – толщина образца ткани, мм

Автор не сделал поправку на то, что воздухопроницаемость не пропорциональна перепаду давления.

Б. Флоринский предложил формулу для определения коэффициента воздухопроницаемости с учетом объема воздуха, проходящего через ткань (V , см^3), площади поверхности ткани (S , см^2), времени движения воздуха (t , сек.) и разности давления для двух сторон ткани (P , $\text{г}/\text{см}^2$):

$$B = \frac{V}{S \cdot t \cdot P} \left[\frac{\text{см}^3}{\text{см}^2 \cdot \text{г} \cdot \text{сек}} \right] \quad (1.23)$$

Коэффициент воздухопроницаемости определен объемом воздуха, проходящего через поверхность ткани за 1 секунду при варьирующемся давлении от $0,2$ до $2 \text{ г}/\text{см}^2$. Нелинейный характер зависимости скорости истечения воздуха от величины перепада давления – недостаток метода [72, 73, 76].

П.Е. Калмыков предложил формулу, которая с учётом постоянного давления даёт обратную зависимость от формулы М. Рубнера. Коэффициент проходимости воздуха он определил через отношение количества проходящего через образец ткани воздуха (A , $\text{см}^3/\text{мин}$;) к произведению площади образца (S ,

см²), давления в момент прохождения воздуха (P) и постоянного давления, установленного им в размере 0,42 мм вод.ст. [22, 3, 28]:

$$k = \frac{A*0,42}{S*P*60} \quad (1.24)$$

Н.С. Федоров предложил формулу, учитывающую значения эмпирических величин (a и b), где воздухопроницаемость ткани (x) зависит от процента перекрытия поверхности образца ткани (k):

$$k = -a * x^{1/2} \div b \quad (1.25)$$

Автор выразил воздухопроницаемость через количество воздуха, который движется через 1м² ткани за единицу времени (1секунда) с учётом перепада давления 5 мм [88]. Особенность используемых параметров формулы заключается в том, что значения a и b установлены для тканей полотняного переплетения. Иные факторы, оказывающие влияние на структуру ткани, во внимание не взяты.

Авторы формул (1.22 – 1.25) для определения воздухопроницаемости не учитывают вариативность структурных особенностей образцов, пористая структура исследована ими нематериальный объект.

Далее перейду к рассмотрению работ, учитывающих влияние строения и пористости ткани на воздухопроницаемость.

Н.С. Еремина предложила формулу для определения воздухопроницаемости (V, л /м² в секунду), беря во внимание вид переплетения, номер пряжи, плотность ткани (C)[17]:

$$V = \frac{a}{C^x}, \quad (1.26)$$

где a = 95000, выражает коэффициент проницаемости, постоянная величина для всех переплетений;

x – показатель степени, $x=2,5$ – постоянная величина для всех переплетений.

Коэффициент связи (C) автор рассчитывает с учетом среднеарифметического номера основы и утка (N_{CP}), теоретическое число связей (P_0, P_y) на 1 см^2 , коэффициент переплетения (F) по формуле:

$$C = \frac{P_0 * P_y}{F * N_{CP}} \quad (1.27)$$

Автор подставляет формулу определения коэффициента связи (1.27) в формулу нахождения воздухопроницаемости (1.26):

$$B = \frac{a * (F * N_{CP})^x}{(P_0 * P_y)^x} \quad (1.28)$$

Формула Н.С. Ереминой описывает гиперболическую зависимость воздухопроницаемости и коэффициента связи, характеризующего структурные особенности ткани [19]. У формулы нет практического применения, т.к. при расчете показатель воздухопроницаемости отличен от фактического значения по некоторым видам тканей, так формула оказалась не применима к расчету воздухопроницаемости саржи и сатина.

Н.С. Порошин доработал формулу Н.С. Ереминой (1.26), и предложил формулу с учетом воздухопроницаемости ткани (B , л/м² в секунду), диаметра нити (d_{CP} , см) и параметра среднего перекрытия ткани основой и утком (F):

$$B = \frac{a * (F * N_{CP})^x}{[P_0 * P_y * (d_{CP} * n)^y * b]^x} \quad (1.29)$$

Приведённая выше формула включает значения плотности ткани по основе и утку (P_0, P_y), показатель степени, учитывающий влияние на воздухопроницаемость среднего диаметра нити и целочисленного параметра n (y),

а также средний номер пряжи (N_{CP}) и целочисленное значение n , полученное экспериментально, характеризующее слоистость ткани [48]

Автор определил среднее значение фактической воздухопроницаемости:

$$B = \frac{a}{O_H^x}, \quad (1.30)$$

где O_H – объем нитей в тканях на 1 см^3 ;

a – коэффициент проницаемости, получен экспериментально;

x – показатель степени, получен экспериментально, учитывает влияние объема нитей на воздухопроницаемость.

Формула (1.29) учитывает реальные связи между структурой ткани и ее воздухопроницаемостью. Формула расчета среднего значения фактической воздухопроницаемости (1.30) дает точность до 80 % для исследуемых образцов тканей [49].

В.Н. Скворцова выразила пористость в процентном значении [60]. Общую пористость (межнитевую, межволоконную) автор определила по формуле:

$$W_0 = 100 - E\nu_B, \quad (1.31)$$

где $E\nu_B$ – коэффициент объемного заполнения волокном.

Сквозная пористость рассчитывается с учетом коэффициента поверхностного заполнения (E_s):

$$f_{СКВ} = 100 - E_s. \quad (1.32)$$

Г.Б. Сайденов предложил следующую формулу пористости через отношение объема воздуха в образце (V_1) к объему всего образца ткани (V_2) [53, 54, 55]:

$$m = \frac{V_1}{V_2}, \text{ при } 0 < m < 1, \quad (1.33)$$

Линейный размер поры ткани автор определил следующим образом:

$$d_э = 4 \frac{S}{\Pi}, \quad (1.34)$$

где S – площадь поры;

Π – периметр поры.

При прямоугольной форме сечения поры предложена следующая формула:

$$d_э = 2 \frac{a_1 * b_1}{a_1 + b_1}, \quad (1.35)$$

где a и b – стороны прямоугольника сечения.

При округлой форме сечения поры автор предложил принимать размер сечения равным диаметру отверстия; если сечение квадратное, то оно равно стороне квадрата.

Автором предложено уравнение для нахождения значения воздухопроницаемости капроновых сеток с учётом пористости (m) и толщины (H , мм.) ткани, плотности воздуха (ρ , кг/м³), средней скорости фильтрации (U , м/с), коэффициентом динамической вязкости воздуха (μ , кг/м с) и ($d_э$, мм):

$$\Delta P = A_1 * \frac{\mu}{d_э} * m^{k_1} * \left(\frac{H}{d_э}\right)^{N_1} * U + A_2 * \rho * m^{k_2} * \left(\frac{H}{d_э}\right)^{N_2} * U^2, \quad (1.36)$$

где k_1, n_1, k_2, n_2 – константы.

Авторы отмечают факторы, значительно влияющие на воздухопроницаемость: пористость, линейный размер поры ткани, толщина ткани.

Е.А. Юхина предложила формулу объемной пористости (формула 1.37) и формулу общей пористости ткани, выраженные в процентах (формула 1.38) [78]. Данная формула кроме прочего учитывает коэффициенты деформации нитей

основы и утка ($\eta_{ОВ}, \eta_{ОГ}, \eta_{УВ}, \eta_{УГ}$) и волокнистого состава, структуру нитей основы и утка (C_o, C_y), а также уработку нитей основы и утка (a_o, a_y):

$$R_V = 100 - \frac{\pi}{4 \cdot 1000 \cdot T_{TK}} \left(\frac{C_o^2 \cdot \eta_{ОВ} \cdot \eta_{ОГ} \cdot P_o \cdot T_o}{1 - 0,01 \cdot a_o} + \frac{C_y^2 \cdot \eta_{УВ} \cdot \eta_{УГ} \cdot P_y \cdot T_y}{1 - 0,01 \cdot a_y} \right), \quad (1.37)$$

$$R_M = 100 - \left(\frac{10 \cdot P_o \cdot T_o}{10^3 \cdot (1 - 0,01 \cdot a_o)} + \frac{10 \cdot P_y \cdot T_y}{10^3 \cdot (1 - 0,01 \cdot a_y)} \right) \cdot \frac{100}{T_{TK} \cdot \gamma \cdot 1000}. \quad (1.38)$$

Определение процентной доли воздушных промежутков показано через разность:

$$R_I = R_M - R_V. \quad (1.39)$$

С учётом предыдущих формул автор предлагает расчет внутренней пористости:

$$R_I = \frac{P_o \cdot (1000 \cdot \pi \cdot d_{ОВ} \cdot d_{ОГ} \cdot \gamma - 4 \cdot T_o)}{4 \cdot T_{MK} \cdot \gamma \cdot (1 - 0,01 \cdot a_o) \cdot 1000} + \frac{P_y \cdot (1000 \cdot \pi \cdot d_{УВ} \cdot d_{УГ} \cdot \gamma - 4 \cdot T_y)}{4 \cdot T_{MK} \cdot \gamma \cdot (1 - 0,01 \cdot a_y) \cdot 1000}. \quad (1.40)$$

Разработанный Е.А. Юхина метод проектирования ткани работает с заданной воздухопроницаемостью, учитывает объемную, внутреннюю и общую пористость, берёт во внимание основные характеристики строения ткани и вид сырья. Вариативность геометрии перечного сечения нити, которую Е.А. Юхина учитывает в своей формуле объёмной пористости, позволяет подойти к вопросу воздухопроницаемости более точно.

Н.М. Левакова предложила формулу определения коэффициента сквозной пористости с учетом плотности ткани (P_o, P_y , нитей/см) и диаметров нитей (d_o, d_y , мм) основы и утка:

$$K_S = 100 - 10 \cdot P_o \cdot d_o - 10 \cdot P_y \cdot d_y + P_o \cdot P_y \cdot d_o \cdot d_y \quad (1.41)$$

Автор предположил, что отверстия могут иметь форму квадрат в срезе, и для данного случая предложил формулу:

$$K_S = (10 - P * d)^2 \quad (1.42)$$

Н.М. Левакова предложила формулу для расчета общей пористости ткани квадратными порами при учете раппорта ткани (R), высоты волн изгиба нитей (h_0, h_y , мм) и числа нитей основы и утка (R_0, R_y):

$$K_V = 100 - \frac{\pi * R^2 * P^2}{h_0 + 2R} \left[\frac{20}{P} + \frac{\pi * P}{160} (h_0^2 + h_y^2) \right] \quad (1.43)$$

Описанные методы, представленные во множестве работ, в основном решают задачи проектирования ткани с заданными параметрами. Но они не затрагивают особенности строения пор детально, с прицелом на сложность изгибов неупрощённой формы. Из чего следует необходимость поиска подхода к подробному изучению геометрических характеристик пористых структур с переходом от схематических представлений о порах к представлению пор как самостоятельных объектов с точными данными. Представленный срез (рисунок 1.1) демонстрирует стандартное представление о сквозной поре (рисунок 1.1 – тонко заштрихованная область). Подобные упрощенные фигуры, параметры которых ложатся в основу расчета, не дают уточненного представления о пористости.

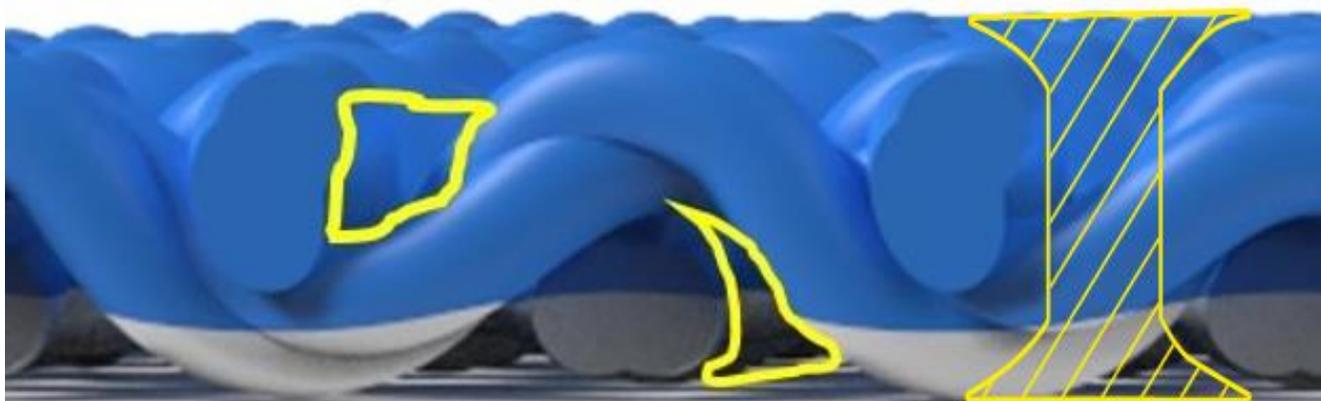


Рисунок 1.1 – Схема сечения некоторых участков пористой структуры полотняного переплетения.

1.4 Обзор работ, посвященных ранним идеям автоматизации проектирования тканей с учетом заданных свойств

Автоматизация проектирования представляет собой широкую область науки и техники, обращённую к методам и средствам создания проектов с помощью компьютера (ПК), оснащенного САПР (системой автоматизированного проектирования). Применение САПР преследует три основные цели:

- 1) повышение качества проектирования и производительности,
- 2) сокращение материальных затрат и времени проектирования и производства,
- 3) устранение повторяющихся и рутинных операций.

Свойства тканей и прогнозирование структуры тканей важны в каждой отрасли промышленности. Как правило, все профессиональные системы автоматизированного проектирования (САПР) для тканей текстильных систем могут достичь базового моделирования ткани для производства продукции.

Различия между конкурирующими системами делятся в основном на следующие категории: логичность расположения управляющих элементов, скорость работы, гибкость настроек, расширение возможностей, техническая

поддержка [40]. Компьютерное моделирование или прогнозирование с помощью моделей ориентировано на стандартные ткани, технический текстиль, композиты.

САПР тканей чётко делится на группы в зависимости от целей и результатов:

- 1) САД-системы, computer-aided-design – система компьютерной поддержки проектирования необходимая для автоматизации работ, направленных на графическую информацию;
- 2) САМ-системы, computer-aided-manufacturing – система компьютерной поддержки процесса изготовления, направленная на автоматизацию участков проектирования, формирования и запуска технологических последовательностей в момент обработке различных объектов.
- 3) САЕ-системы, computer-aided-engineering – отвечает за поддержку расчетов определенных расчётных задач.

На проектирование качественных новых тканей с применением САПР оказывает влияние множество факторов. Например, указанные механические и гигиенические свойства ткани. Программное представление научных изысканий чаще всего строиться на готовой платформе, но ряд авторов предлагает собственные разработки. О.М. Раченкова предложила программу, отличительной особенностью которой является оперативное построение геометрических моделей строения тканей, на основе которых можно давать оценку проектируемой ткани. Программа С.В. Малецкой позволяет спроектировать узор и подготовить техническую документацию на персональном компьютере. Г.Л. Слостинной и Р.И. Сумаруковой разработаны алгоритмы для построения переплетений. Алгоритмы обеспечивают рациональный выбор параметров строения проектируемых тканей и расчет заправочных параметров тканей.

Алгоритмы и методы проектирования тканей по заданным параметрам предложены многими авторами [68]. Например, Г.Л. Слостина и Р.И. Сумарукова [62, 64] рассмотрели мелкоузорчатые переплетения для получения теневых эффектов, а также определили закономерности их построения, разработаны

алгоритмы для построения на ЭВМ. Г.И. Борзунов и А.В. Фирсов и др. предлагают методы автоматизации при проектировании и расчете параметров строения тканей [71].

Автоматизированное проектирование тканей – направление, расширяемое не только за счет предлагаемых алгоритмов и методов, но и представлением их в программном виде. САПР тканей позволяют выполнять работы технологичнее, избегая ошибок, учитывая сроки реализации заданного проекта.

1.5 Обзор работ, посвященных вопросам моделирования и визуализации тканых структур

Существует ряд работ, посвященных моделированию тканей и трикотажных полотен с помощью компьютерного моделирования. Но детальная проработка тканых структур не распространена среди разработчиков трехмерных цифровых объектов. Часто каркасная сетка моделей максимально упрощена и схематична. Из-за невозможности обойти ошибки и отказы внедрения модификаторов имитации физического изменения соприкасающихся объектов модели дорабатываются ручным методом или разработчики полностью игнорируют учет физических особенностей строения тканых структур и создают переплетение в схематичном виде.

Значительный рост интереса к исследовательской деятельности, связанный с компьютерным моделированием, пришелся на 2013–2015 года, когда разработчики программного обеспечения значительно дополнили функционал, внесли новые алгоритмы для повышения качества взаимодействия пользователя и программы. Сейчас область трехмерного моделирования соединяется со многими направлениями исследований и отраслями производств [20]. Особенно это связано с доказанной экономической эффективностью прототипирования.

П.Н. Колесников, А.Н. Иванов, А.М. Киселев, Э.А. Хамматова задались целью использовать виртуальную модель текстильного материала в качестве

исходных данных для исследования процессов массопереноса паров жидкостей с текстильных материалов с использованием программного обеспечения Flow 3D [30]. Примечательно, что данная модель значительно упрощена, что может привести к менее точным данным при дальнейшем исследовании на основе данных, полученных с использованием выбранного объекта моделирования. Авторы предложили алгоритм ручного способа построения полотняного переплетения, продемонстрировали некоторые этапы процесса получения модели на платформе 3DstudioMax и рендер итоговой модели (рисунок 1.2).

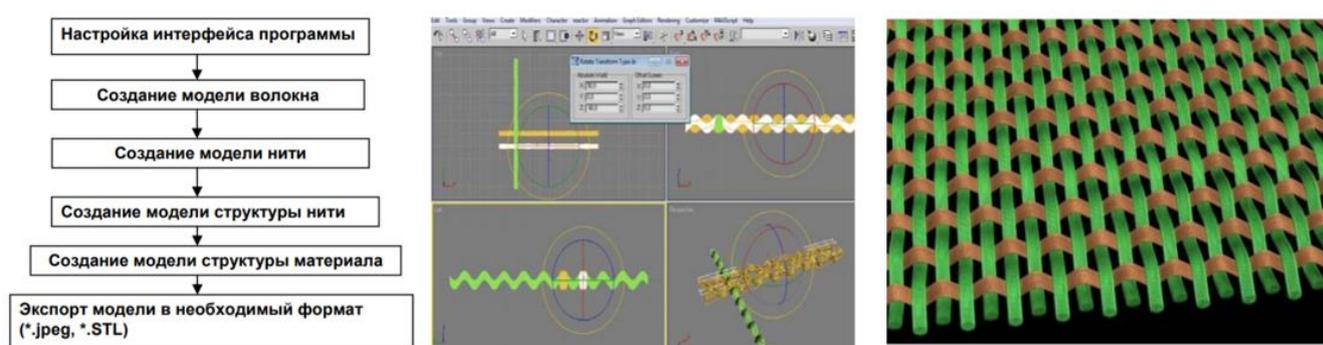


Рисунок 1.2 – Алгоритм и этапы проектирования полотняного переплетения.

Проблема упрощения – это проблема дальнейшей достоверности данных при работе с цифровыми моделями. Максимальное приближение к реальному образцу – вопрос не столько кропотливой работы, сколько технических возможностей и поиска новых способов обработки структуры модели.

С.Н. Матвеев предлагается обрабатывать фотографии образцов тканей в программе двумерной графики CorelDRAW и в пакете программ семейства Adobe (Photoshop, Illustrator, InDesign) для компьютерного моделирования реалистичных текстильных объектов [43]. Исследование тканей выполняется бесконтактно за счет фотографических образцов. Данная идея оптического метода развита и в более ранних работах, посвященных проектированию структуры или узоробразования текстильных полотен [44, 46]. Наибольший интерес к оптическому методу исследования и применению программ для обработки

графики возрастает в сфере реставрации текстильных экспонатов – обширном прикладном назначении компьютерного двумерного моделирования [10, 11, 58].

В ходе исследовательской деятельности было сделано предположение о возможности использования программы Adobe Photoshop для изучения структуры тканых образцов [35, 38]. Реализация отклонилась от задачи моделирования тканых структур: упор в работе сделан на автоматизированные алгоритмы улучшение качества изображения. Практическое применение данных алгоритмов находится в сфере реставрации, реализуемо для задачи цифрового моделирования узорного фактурного текстильного полотна реставрируемого объекта. Данные алгоритмы применимы для улучшения или доработки визуализированного образца, полученного в ходе трехмерного моделирования.

Моделирование полотна в трехмерной программной среде подробно освещено в работе А.В. Чарковского и Д.А. Алексеева [74]. Примечательно, что моделированию каркаса сетки уделено значительное внимание и для понимания качества исполнения достаточно визуальной оценки рендеров: выражена плавность линий модели, отсутствуют заломы или неадекватно расположенные тени. Вопросы изучения структуры модели и пористого строения в тканых и трикотажных образцах с точки зрения технологии компьютерного моделирования образца могут иметь одну и ту же технологию: базовый набор инструментов и исходных сплайнов, функции нормализации сетки, операции проработки физического взаимодействия деталей модели одинаковы. Авторы описали порядок использования функций программы 3DstudioMax, подробно изложив порядок операций ручного метода построения модели без учета геометрии сечения, однако полученные части объекта являются прекрасным образцом точности расположения каждого полигона модели по отношению к его окружению, что приближает модель к высокореалистичной структуре (рисунок 1.3).

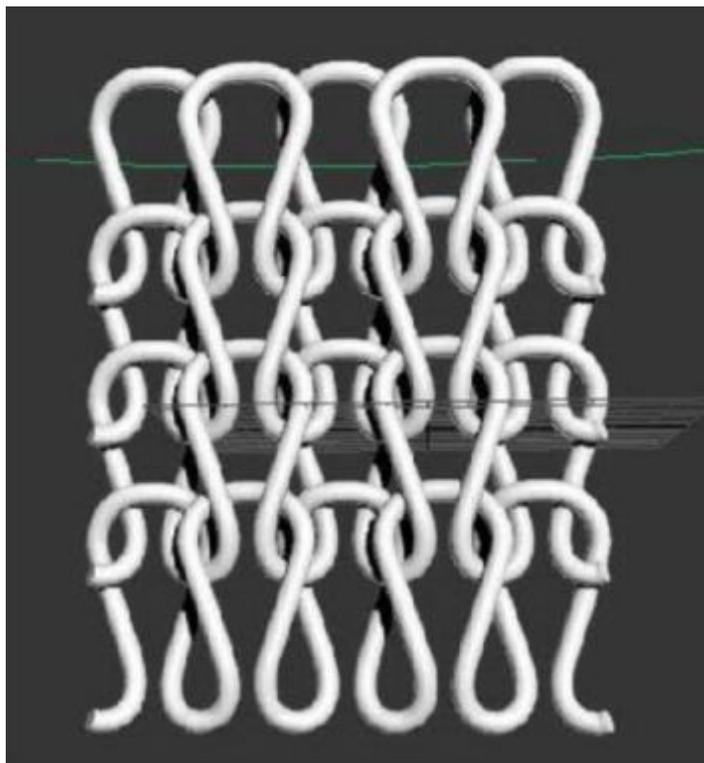


Рисунок 1.3 – Изображение реалистичной структуры трёхмерной модели трикотажного образца.

1.6 Исследования влияния применения аддитивных технологий на свойства тканей

Существует ряд работ, посвящённых прикладному назначению аддитивных технологий, например, в вопросах драпируемости тканей. Процесс автоматизированного проектирования самих тканых структур в них не освещается или освещается частично, но подробно показан результат анализа или описан алгоритм анализа изменений, произошедших с тканью после 3D-печати на ней геометрических объектов.

Д.Б. Рыклин и группа исследователей предложили программу *DrapeCalculator*, написанную на языке программирования Python, для расчета показателей драпируемости тканей на основе значений, полученных путём 3d-сканирования. Программа обрабатывает результаты 3D-проб драпированной ткани и выдает оценку драпируемости – коэффициенты регрессионных моделей,

которые по утверждению авторов характеризуют форму поверхности драпированных объектов [52].

Несколько специалистов из университетов Германии и Албании предложили способ драпировки текстильных изделий с помощью паттернов, полученных аддитивным методом. Авторы утверждают, что драпировка является одним из важных эстетических свойств ткани [96] и имеет большое значение для выбора подходящей ткани для конкретного изделия. Авторы систематизировали варианты итоговой драпировки, нашли соотношение геометрических свойств печатного паттерна эффекта драпировки.

Данная работа является примером распространения аддитивных технологий на совершенствование или видоизменение внешнего свойства ткани, она не лишена практического применения и может быть востребована в сфере реконструкции исторических текстильных изделий (например, костюмов, драпированных с применением бусин и стеклярусных вышивок), а также художественного оформления ткани.

1.7 Математическая модель научно-исследовательской деятельности в текстильной промышленности

Построение математической модели – один из методов проектирования какого-либо процесса. При работе над данной диссертацией особенно актуально было определить и зафиксировать в строгой форме логику получения научного знания. Кратко обращаясь к основным понятиям научного знания можно соотнести части математической модели, а обращаясь к примерам – получить модель научно-исследовательской проектной деятельности, отражающую реальный ход получения научного знания.

Научно-исследовательский проект как цикл деятельности включает в себя три основные фазы: фаза проектирования, технологическая фаза, рефлексивная

фаза. Разбиение процесса исследования на фазы, стадии и этапы (временная структура исследования) имеет несколько условный характер (таблица 1.1) [80].

Таблица 1.1 – Фазы, стадии и этапы научного исследования

Фаза	Стадии	Этапы
Проектирования	Концептуальная стадия	Формулирование проблемы Выявление противоречий Определение цели исследования Формирование критериев
	Стадия построения гипотезы	Формулирование, оценка, обоснование и структурирование проблемы.
	Стадия конструирования исследования	Определения его задач и его планирования. Создание программы (методики) исследования
	Стадия технологической подготовки исследования	Проведения исследования и оформления результатов.
Технологическая	Стадия проведения исследований	Теоретический этап (анализ и систематизация литературных данных, отработка понятийного аппарата, построение логической структуры теоретической части исследования) и эмпирический этап – проведение опытно-экспериментальной работы.
Рефлексивная	Стадия оформления результатов	Публикация, обсуждение результатов.

Изучая труды профессоров РГУ им. А.Н. Косыгина, можно построить схему движения логического развития изучаемой проблемы и пути ее решения. В качестве теоретической направляющей выбран учебник «Методы и средства исследовательских процессов в текстильной промышленности», где подробно рассмотрены вопросы предварительного, активного и пассивного экспериментов, а также оптимизация механических и технологических процессов, приведены общенаучные методы и средства исследования [31, 56]. В качестве практического примера исследования технологических процессов выбрана монография «Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве». Авторы рассматривают научно-технический прогресс, как на необходимое условие мощного развития текстильной промышленности, невозможное без оптимизации, автоматизации, компьютеризации и роботизации производства [31, 45]. Основанные на современных научных теориях, экспериментальные и аналитические методы исследования, математические и статистические методы обработки данных определены авторами работы как обязательное условие практически значимого результата.

Для успешного управления научными, техническими и технологическими процессами и получения качественных результатов труда научного сотрудника необходим жесткий каркас из принципов построения исследовательской деятельности. Если рассматривать ход научной мысли авторов и соотнести ее с жизненным циклом научной деятельности, то можно построить алгоритм действий, приносящий положительный результат в исследовательской деятельности.

Моделирование процессов приятно осуществлять с помощью диаграмм [15, 31, 51]. В данном случае за наглядное представление процесса могут отвечать диаграмма деятельности или диаграмма вариантов использования, описанные на языке UML. Визуальное моделирование на языке UML выглядит как последовательный процесс пошагового движения от глобальной модели, идеи, концепции к модели, подробно и логично описанной, позволяя ей стать

органичной частью программной системы. Под системой в языке UML понимается логически выстроенная деятельность, направленная на решение какого-либо запроса. В качестве запроса к системе может выступать любой проблемный вопрос [24]. Множества сущностей (актеров) по средствам направления запросов (вариантов использования) взаимодействуют с системой – суть предлагаемой диаграммы (рисунок 1.4).

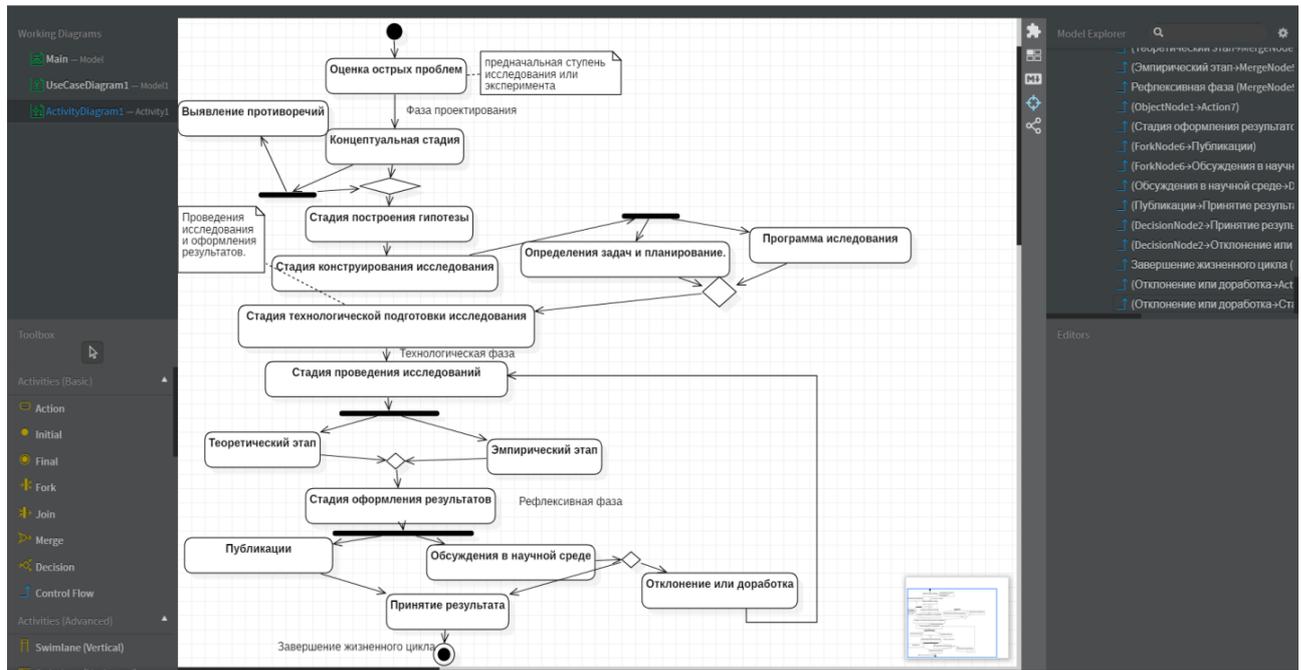


Рисунок 1.4 – Жизненный цикл исследовательского процесса в науке, система StarUML.

Для двух рассматриваемых изданий [45, 56] характерен упор на автоматизирование и компьютеризирование технологических процессов. Авторы определяют метод математического моделирования как точный и результативный. Данный выбор обусловлен его влиянием на экономическую эффективность исследовательского проекта от идеи и эксперимента до завершения рефлексивной фазы [32].

Выводы по первой главе

- 1) Воздухопроницаемость – важнейшая характеристика тканой структуры, проектируемой с заданными свойствами, и главный фактор определения гигиенических свойств ткани.
- 2) Анализ работ, посвящённых проектированию тканей с учетом воздухопроницаемости, показал, что предлагаемые авторами методы работают с упрощенной геометрией пористых структур и используют сложно определяемые величины для конечных формул. Различные алгоритмы и методы проектирования тканей по заданным свойствам ограничиваются в значительном большинстве случаев по видам переплетения.
- 3) Анализ работ, посвященных ранним идеям автоматизации проектирования ткани с заданными свойствами, показал, что компьютерное проектирование – необходимый этап работы при создании новых видов тканей или изменения их характеристик.
- 4) Анализ работ, посвященных вопросам моделирования и визуализации тканых структур и влиянию применения аддитивных технологий на свойства тканей, показал, что оптимальная среда для трёхмерного моделирования должна быть выбрана с учетом использования модификаторов физического взаимодействия соприкасающихся элементов модели. Трёхмерное моделирование текстильных переплетений чаще всего выполнялось в среде программы 3DstudioMax.
- 5) Дальнейшее развитие научной мысли и направление поиска решения вопроса уточнения и исследования пористой структуры как материального объекта определены в ходе обращения к трудам профессоров университета, обранных в модель жизненного цикла научно-исследовательской деятельности. Моделирование позволило структурировать этапы и сфокусировать внимание на эффективных инструментах исследования.

ГЛАВА 2. СРЕДА ОБЪЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОТИПА. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МАТЕРИАЛИЗАЦИИ ТКАНЫХ СТРУКТУР

Проектирование тканых структур с помощью цифровых технологий подразумевает использование компьютерных сред проектирования. Среди современных программ для проектирования выбор сделан в пользу пакета Autodesk 3Ds Max. Построение модели в этой программе не ограничено статическими возможностями, визуализируемый материал можно изучать с помощью статистического окна и свободно устанавливаемой камеры.

2.1 Программное обеспечение, инструменты, фигуры и функции для проектирования тканых структур

3Ds Max – современное программное обеспечение 3D-моделирования, включающее полноценные и многоуровневые возможности анимации, а также рендеринга. Первоначальные цели, для которых разрабатывалась данная среда, – проектирования игр, локаций и персонажей, а также дизайн-визуализации. Сейчас среда 3Ds Max служит архитекторам, специалистам по проектированию и макетированию в области строительства, дизайна, производства, она активно используется для визуальных эффектов в кино- и телеиндустрии. Для описанных задач работы применены различные гибкие инструменты проектирования и имитации физики взаимодействия объектов, позволяющие построить нестандартные реалистичные структуры. Важным качеством проектируемого объекта является высокая детализация и возможность влияния на качество полигональной сетки.

Отдельным аспектом изучения и направлением работы специалистов является рендеринг. 3D-рендеринг имеет возможность имитации реальных настроек камер. Программа согласовано работает с различными приложениями для рендеринга: MentalRay, finalRender и vRay.

Самым близким аналогом программы можно считать пакет Maya. Отличие возникает в вопросе специализации программ: Maya отличают более широкие и специфические коллекции, наборы инструментов для анимации и визуальных эффектов. Обе программы – продукты компании Autodesk.

Программа 3Ds Max при должном отборе необходимых объектов формирования тканой структуры позволяет спроектировать тканые переплетения и воссоздать любую их геометрию (от упрощенной до детализированной и идентичной реальной).

Высокая детализация подразумевает и высокую полигональность объекта. Процесс создания детализированного полигонального объекта значительно зависит от производительности персонального компьютера, в данной работе момент создания пористой структуры переплетения и ее вычленения является точкой максимальной нагрузки на компьютер.

Для проектирования тканых структур определены основные инструменты, фигуры, которые представлены в виде таблиц.

Инструменты программы играют вспомогательную роль. Они необходимы для выделения и перемещения объектов во время расстановки относительно друг друга, направления камеры в случае визуализации сложной сцены (Таблица 2.1). Инструмент SelectandMove используется в процессе проектирования и относится к группе манипуляторов, куда входят еще два: SelectandRotate и SelectandUniformScale.

Таблица 2.1 – Инструменты выделения и манипуляции для задач проектирования

Название	Иконка	Назначение
SelectandMove / Выделение и перемещение		Кроме выделения, позволяет выполнить перемещение объекта по одной или двум осям.

SelectandRotate / Выделение и поворот		Кроме выделения, позволяет выполнить вращение объекта в выбранном направлении.
SelectObject/ Выбрать объект		Выделение объекта для дальнейшей манипуляции над ним.

Фигуры, из которых построены объекты, – это примитивы (или стандартные фигуры) и сплайны (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Базовые объекты проектирования тканых структур

Название	Назначение
Plane	«Плоский объект», плоскость, планшет – особый тип плоской полигональной сетки, которая может быть увеличена на любую величину во время рендеринга. Используется объект для создания крупномасштабной плоскости, которая не мешает работе в видовом окне. Относится к набору примитивов.
Line	Объект Line используют для создания сплайна свободной формы, состоящего из нескольких сегментов, имеет настройки интерполяции и сегмента. Относится к набору сплайнов.
Star	Объект Star используется для создания замкнутых звездообразных сплайнов с любым количеством точек. Звездные сплайны настраиваются по двум радиусам. Относится к набору сплайнов.
Box	Box, коробка – единственная вариация параллелепипеда. Относится к набору примитивов.

2.2 Проблемы применения логических операций в среде 3Ds MAX. Ретопология трехмерной компьютерной модели.

Проблема обработки объектов при помощи булевых операций заключается в сложной или неверной топологии сетки. Булевы операции – это логические операции над объектами; в набор операций в среде проектирования входят операнды AND, OR, NOT, XOR и другие [79].

В программе имеется пять типов булевых операций, которые могут быть применены для построенных моделей (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Булевы операции в 3Ds MAX

Название	Перевод	Результат операции
Union	Объединение	Объект, полученный вследствие объединения двух исходных объектов, части объектов, оказавшиеся внутри общего внешнего объема, удаляются.
Intersection	Пересечение	Объект, полученный вследствие пересечения двух исходных объектов, части объектов, оказавшиеся вне общего внутреннего объема, удаляются.
Subtraction (A-B) /Subtraction (B-A)	Вычитание (A-B)/ Вычитание (B-A)	Объект, полученный в результате вычитания одного объекта из другого: все части полученного объекта отсекаются объемом первого и удаляются.
Cut	Вырезание	Объект, полученный в результате вырезания из первого объекта в

		местах пересечения со вторым объектом соответствующих отверстий и проемов.
--	--	--

В компьютерной графике, в сфере цифрового проектирования наборы булевых операций используют широко. Функции просты в применении на объектах-примитивах, стандартных сетках и любых «не нагруженных» моделях. Модель может быть названа нагруженной, если на малых участках встречаются изломы, сгибы, плавные изгибы поверхности, которые перемежаются с гладкими сетками или перетекают в еще более сложную геометрию. К таким нагруженным объектам относятся и модели тканых структур.

У сложных моделей при применении булевых операций возникают следующие ошибки: отсутствие обработки, сброс функции, исчезновение объекта обработки. При ошибке программой может быть выдано одно из окон сообщений: «Логическая операция применяется к некорректной или неверной геометрии модели» или «Неверное логическое значение».

Разработчики программы 3Ds Max при использовании логических операций советуют предварительно загрузить последний пакет обновлений, чтобы избежать ошибок, как при использовании логических операций, так и при использовании инструментов-модификаторов ProBoolean. Однако обновления не распространяются на группированные объекты или объекты, слитые из групп в единую сетку.

Существуют несколько способов доработки модели, которые позволяют в дальнейшем результативно применить булевы операции к объекту:

- удаление изолированных вершин,
- удаление перекрывающихся граней,
- поиск и соединение разомкнутых вершин или граней,
- выравнивание нормалей (некорректные нормали граней полигонов – одна из частых причин невозможности применения булевых функций),

– сброс состояния модели.

Приведенные выше способы, применяемые по отдельности или в комбинации, позволяют подготовить поверхность моделируемого объекта к булевым операциям. Главная их цель – устранение ошибок строения сетки или ее полигонов. Однако, если строение полигональной сетки полученное с помощью автоматизированных функций и не имеет ошибок, то проблема применения булевых функций может скрываться в нагруженности полигональной сетки, с которой не может справиться выбранный операнд. При этом вид операнда не имеет значения.

В таком случае следует обратиться к ретопологии полигональной сетки. Прежде чем обратиться к этому вопросу, рассмотрим понятие топологии в среде трехмерного проектирования. В широком смысле топология является способом построения объекта, а в полигональном моделировании – формирование полигональной сетки объекта [66].

Топология сетки объекта формирует восприятие человеком объекта, влияет на качество и скорость редактирования, применения модификаторов и визуализации модели в цифровом пространстве. Правильная полигональная сетка позволяет представить образ объекта, его характерные геометрические черты. Главное правило построения топологии сетки заключается в том, что полигон должен иметь четыре грани (и четыре точки, соответственно), которые лежат в одной плоскости, точки соединяются строго последовательно, геометрия полигона должна быть максимально приближена к прямоугольнику или квадрату. В сложных полигональных сетках допустимо малое число треугольных или пятиугольных полигонов при условии их локализации на одной плоскости. К полигонам не прямоугольного типа деформации не применимы технически, либо применяемые деформации заведомо подразумевают усложнение и появление дефектов сетки. Ниже приведены участки топологий сетки одного и того же демонстрационного объекта (рисунок 2.1).

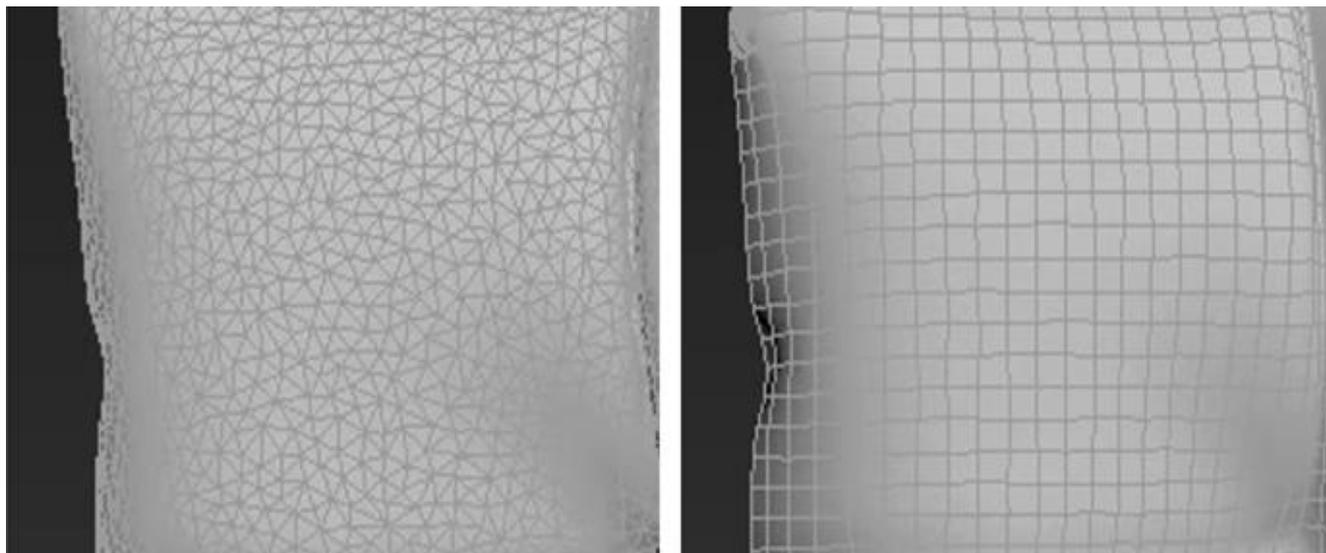


Рисунок 2.1 – Топология объекта: неверная – слева, верная – справа.

Топологию сетки можно изменять вручную или с помощью специальных модификаторов. Применение последних – автоматизированный процесс обработки полигональной сетки. Например, модификатор *Subdivision Surface* позволяет сгладить модель и создать высоко полигональную сетку.

Ретопология – это изменение полигональной сетки объекта без потери его формы. Именно ретопология, а не модификаторы оптимизации сетки, необходима в процессе проектирования и подготовки к булевым операциям моделей тканых структур.

Прототипирование объекта можно выполнять сразу в нескольких программных средах, выбирая наиболее эффективные функции и модификаторы в каждой из них. Для задачи ретопологии подходит среда трехмерного моделирования с открытым исходным кодом и поддержкой всего 3D-конвейера Blender [82, 84], в которой для созданных моделей выполнен минимальный и достаточный набор действий для подготовки топологии сетки объектов тканой структуры к применению булевых операций. Для сетки модели отдельно (в зависимости от сложности строения объекта) или совместно включается «Привязка к сетке» и применяется модификатор «Обтягивание».

При включении привязки происходит установка привязки элементов полигональной сетки к осям: вершины будут проецироваться на ближайшую поверхность в области просмотра (оси XYZ). Данная привязка удобна, так как в процессе моделирования нет необходимости заботиться о правильной топологии, можно сосредоточить внимание на форме создаваемого объекта.

Модификатор «Обтягивание» наиболее эффективно работает в комплексе с функцией «Привязка к сетке». Модификатор «обтягивает» выбранный объект новой полигональной сеткой, не нарушая формы объекта. Он перемещает каждую вершину объекта до ближайшей точки на поверхности данной сетки, может применяться к полисеткам, кривым, поверхностям и текстам.

Проблема сопоставимости форматов двух программ решаема и не является сложным или нетривиальным процессом: формат «.max» модели из программы 3Ds MAX открывается только в указанной программе, поэтому для работы в программе Blender модель необходимо экспортировать в любой из считываемых программой Blender форматов (например, .obj или .fbx). В программе 3Ds MAX без ошибок открывается обработанная модель. Далее можно переходить к применению булевых функций. Именно ретопология в программе Blender позволяет восстановить вид сетки так, чтобы избежать дефектов строения.

2.3 Прототипирование и аддитивные технологии

Прототипирование различных объектов значительно ускоряет процесс создания итоговой модели, делает ожидаемый результат более точным, позволяет исключить скрытые ошибки, снижает стоимость выходного объекта, что является неоспоримым преимуществом в экономически акцентированном вопросе современных технологий и производств [33]. В вопросе современного проектирования тканей прототипирование моделей, готовых к трехмерной печати, – реально возможный путь к детальному изучению геометрических свойств структур тканых переплетений [7]. Прототип не обязательно должен быть

отпечатан, однако при проектировании максимально реалистичного объекта этапы подготовки к печати одновременно являются и этапами совершенствования форм, например, удаления дефектов моделирования, артефактов, нормализации сетки каркаса [16, 34]. Файл с созданной разработчиком трехмерной моделью загружается в аппарат, где происходит изготовление изделия путем послойного наплавления материала.

Аддитивные технологии активно применяются в энергомашиностроении, приборостроении, авиационной промышленности, где высока потребность в изделиях сложной геометрии [3, 5, 36, 37, 39, 83, 85, 86, 92, 94, 97, 98]. На сегодняшний день выделяют четыре технологические группы производства объекта на 3D-принтерах:

- 1) послойное формирование деталей из полимерной расплавленной нити;
- 2) селективное формирование путем сплавления металлического порошка;
- 3) селективное формирование путем лазерного спекания полимерных порошков;
- 4) лазерная стереолитография.

Печатная модель – это материальный вариант промежуточного изготовления образца или результат завершённой работы над прототипом. После загрузки в печатный аппарат и ее анализа, программным обеспечением принтера она нарезается на тонкие слои, а затем превращается в набор инструкций на машинном языке (G-код) для выполнения принтером [42].

Способ работы 3D-принтера зависит от формирующего процесса [81, 87, 93, 95]. Например, настольные FDM-принтеры расплавляют пластиковые нити и укладывают их на платформу для печати через сопло с компьютерным управлением [99]. Крупные промышленные SLS-машины используют лазер для спекания тонких слоев металлических, силиконовых или пластиковых порошков. Доступные материалы подбираются в первую очередь в зависимости от

технологии производства объекта. Пластмассы являются наиболее распространенными материалами, далее по частоте применения идут порошки, затем – металлы и сплавы. Производимые детали могут иметь широкий спектр специфических физических свойств: от оптически прозрачных до резиноподобных. В зависимости от размера детали и типа принтера среднее время печати занимает от 4 до 18 часов.

Преимущества 3D-печати:

- визуализация геометрии любой сложности;
- низкие стартовые затраты на прототипирование;
- широкий ассортимент специализированных материалов.

Недостатки 3D-печати:

- более низкая прочность и анизотропные свойства материала (относительно пластика);
- постобработка и удаление поддержек (опор).

Трехмерная печать всегда начинается с аппаратного анализа цифровой трехмерной модели – проекта физического объекта. В аддитивном процессе объект анализируется по размеру, который может быть изменен автоматически или определен оператором, в результате анализа программное обеспечение автоматически строит оптимальные опоры для заданной толщины наплавленного слоя.

Выводы по второй главе

- 1) 3D-печать позволяет создавать сложные формы с использованием меньшего количества материала, чем традиционные методы производства. Среди методов 3D-печати самым популярным является метод аддитивного (послойного) наплавления (Fused deposition method, FDM). Технология позволяет использовать легкий в получении синтетический полимер – акрилонитрилбутадиенстирол.
- 2) При исследовании пористых структур ткани как материализованных в цифровом пространстве объектов необходимо использовать прототипирование, а для печати пористых структур – аддитивный метод создания трехмерных твердых объектов.
- 3) Прототипирование предлагает широкие возможности для исследования проектируемого объекта, т.к. в процессе создания форм можно проводить исследование их меняющейся или уже законченной геометрии. Геометрические характеристики трехмерной цифровой модели можно запрашивать для определенного участка или целой структуры.
- 4) Предложено решение организации каркаса и каркасной сетки пористой структуры, предотвращены возможные ошибки в исследовании структуры из-за погрешностей внешнего представления.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТКАНЫХ СТРУКТУР

3.1 Порядок проектирования ткацкого переплетения в среде 3Ds MAX

Этапы проектирования в данном разделе наглядно переставлены на примере полотняного переплетения, порядок шагов зафиксирован в приложении (общий алгоритм действий содержится в Приложении Г (Приложение Г, рисунок Г.2). Для любого другого переплетения, предложенного в работе, данный метод применим на всех этапах. Однако в момент формирования опорных точек структуры каждому отдельному переплетению необходимо уделить внимание и внести настройки, не поддающиеся общему алгоритму, отвечающие за уникальную структуру модели. Считаю, что с помощью оригинальных скриптов можно свести эти операции к задачам автоматизированного проектирования.

В среде 3Ds MAX есть возможность создать идентичную модель, учитывающую самые мельчайшие детали. Для оптимизации работы форма сечения нити была определена из трех объединённых и слитых звездных объектов (рисунок 3.1, рисунок 3.2).

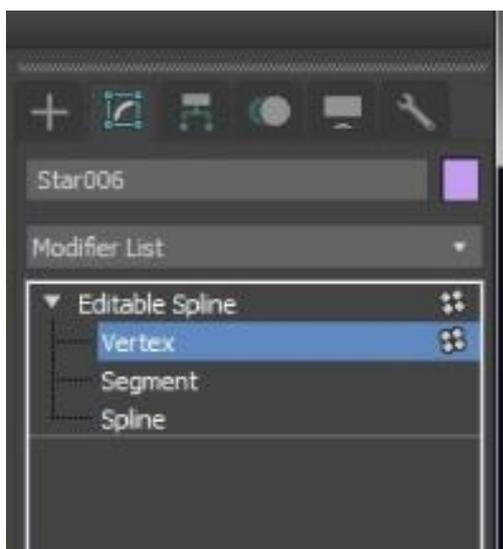


Рисунок 3.1 – Обращение к образованию группы объектов типа Star

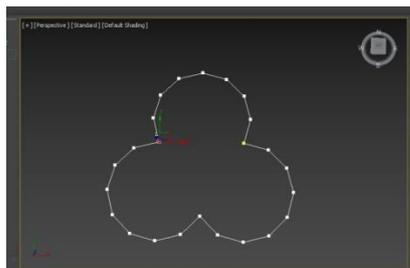


Рисунок 3.2 – Сложный сплайн для контура сечения нити

Эффект кручения может быть добавлен к создаваемой структуре. Программа позволяет имитировать эффект, внедрить его в структуру. Внести коэффициент крутки с помощью эффекта кручения в ходе реализованного метода можно только приблизительно, выполнить эту операцию точно реально при подготовке ручного расчета координат и расстановки псевдообъектов для интервальной разметки.

Пошаговый и иллюстрированный процесс представлен ниже. Масштабирование в среде проектирования 3Ds MAX – процесс, который можно выполнить в любой момент без потери качества объекта. В момент формирования модели масштаб следует выбирать таким образом, чтобы было удобно и просто вести необходимые расчеты.

- 1) Создать фигуру Plane размером (рисунок 3.3).

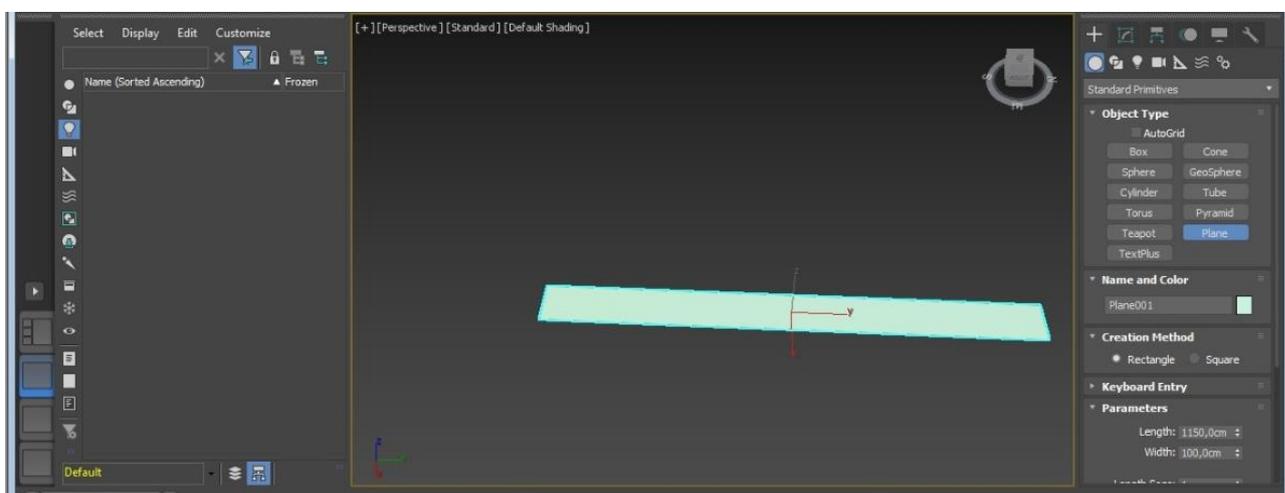


Рисунок 3.3 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 1.

- 2) Используя привязку по Vertex создать фигуру Line по двум вершинам ранее созданного Plane (рисунок 3.4). После этого фигуру Plane удалить.

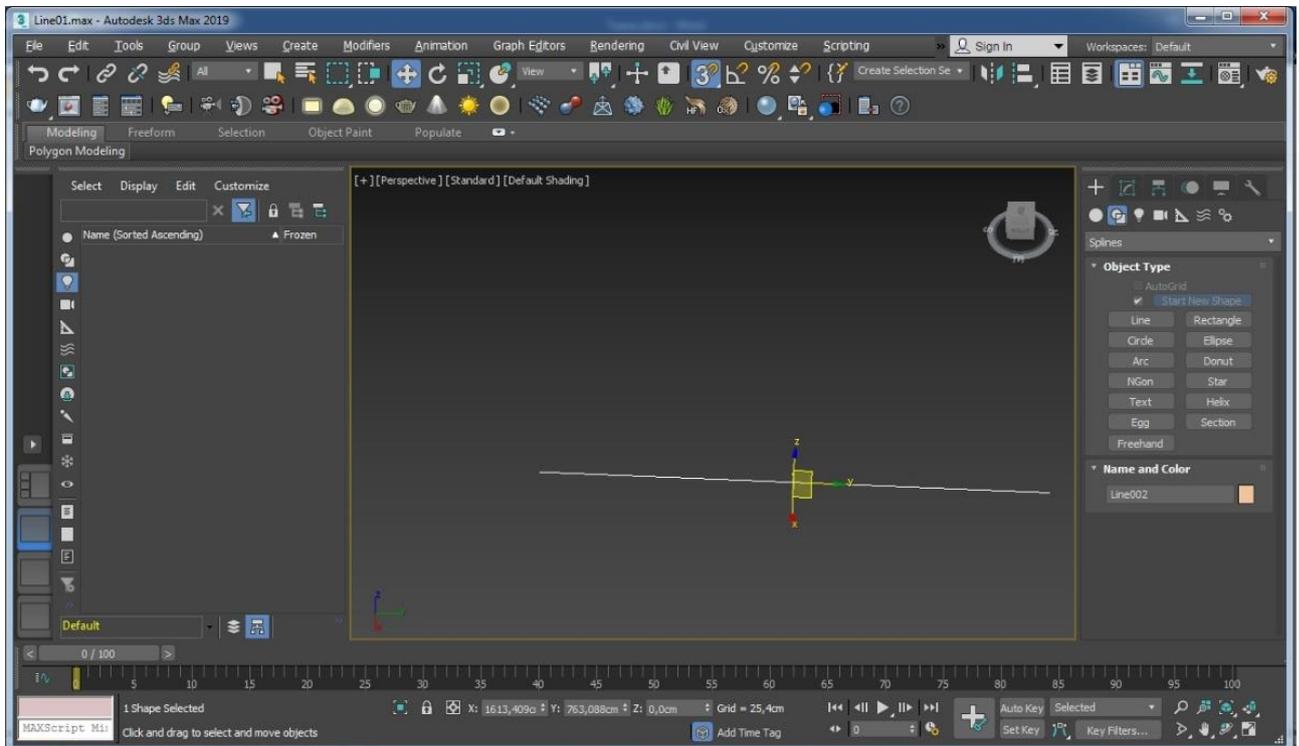


Рисунок 3.4 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 2.

- 3) Перейти к редактированию Segment в созданной Line и выделить единственный сегмент фигуры (рисунок 3.5). Создать дополнительные 45 сегментов при помощи кнопки Divide.

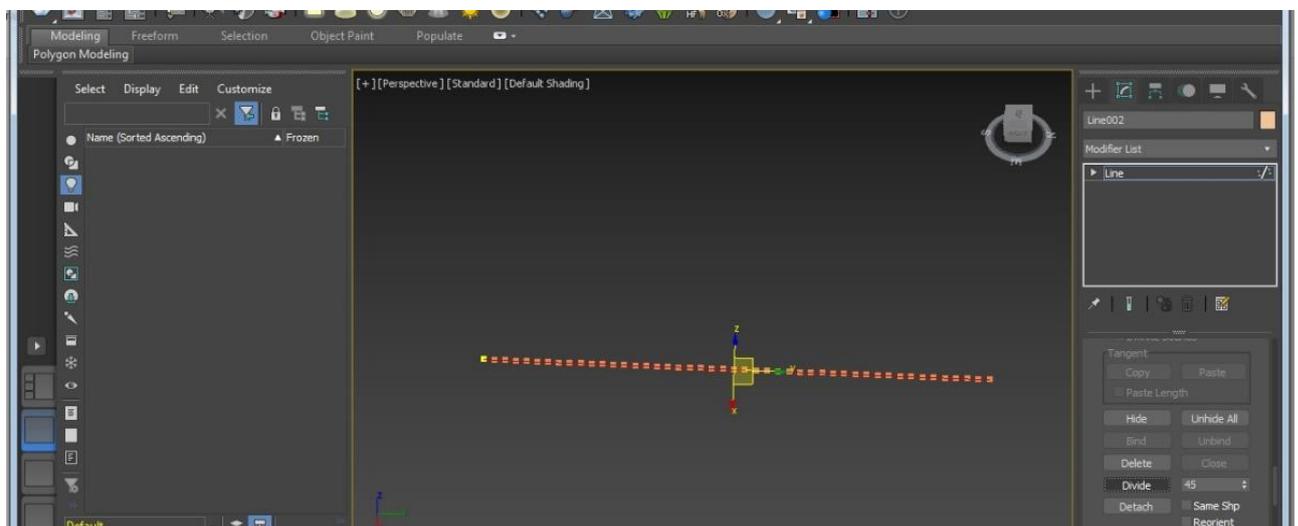


Рисунок 3.5 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 3.

- 4) Перейти к редактированию Vertex в окне Left. Расположить Vertex на оси Z со смещениями 40,50,40,0,-40,-50 единиц и так далее. Результат на рисунке ниже (рисунок 3.6).

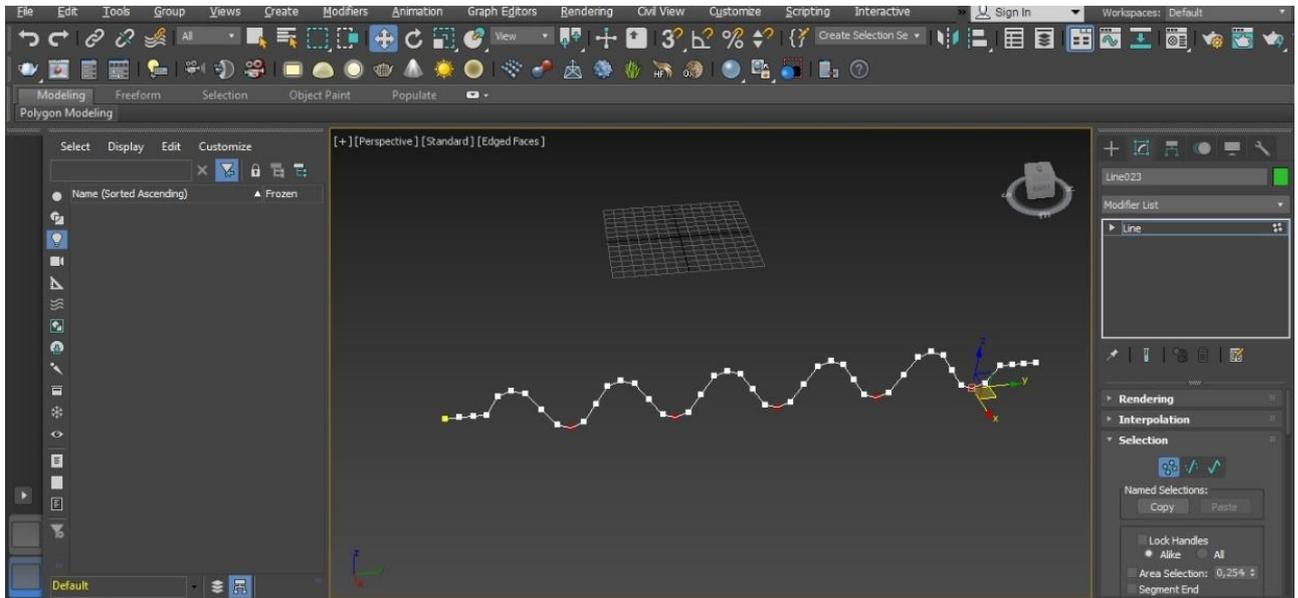


Рисунок 3.6 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 6.

- 5) Выделить все Vertex и применить Smooth (рисунок 3.7).

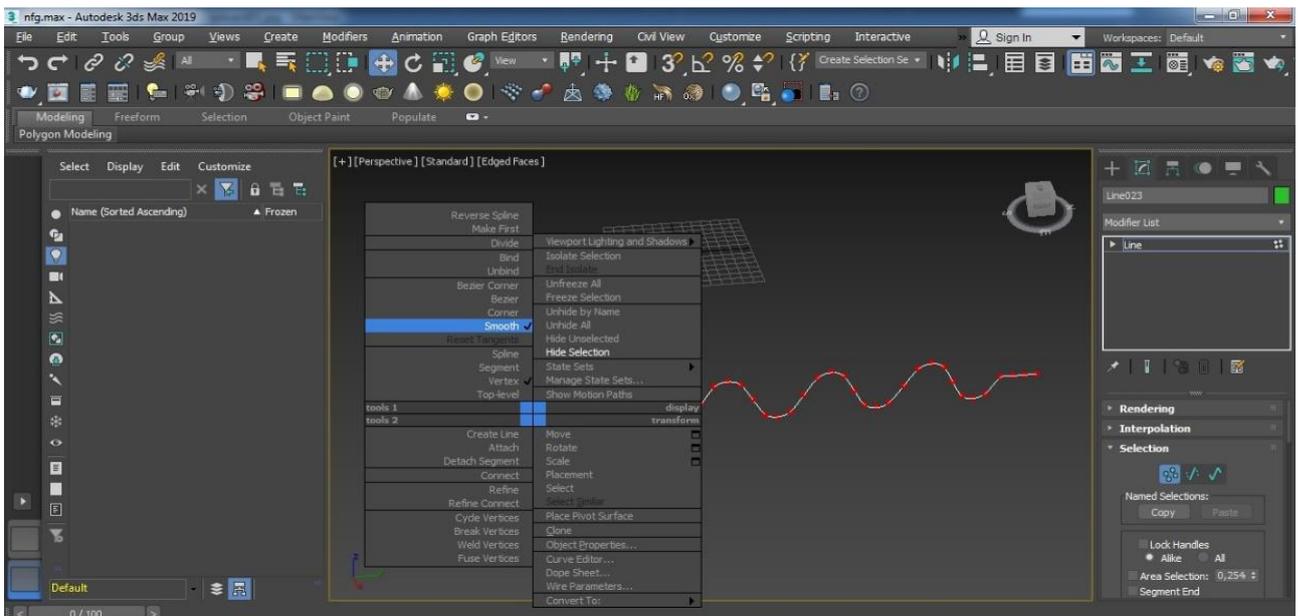


Рисунок 3.7 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 5.

- б) Создать ещё 1 фигуру Line, с такими же параметрами, но со смещением Vertex (рисунок 3.8).

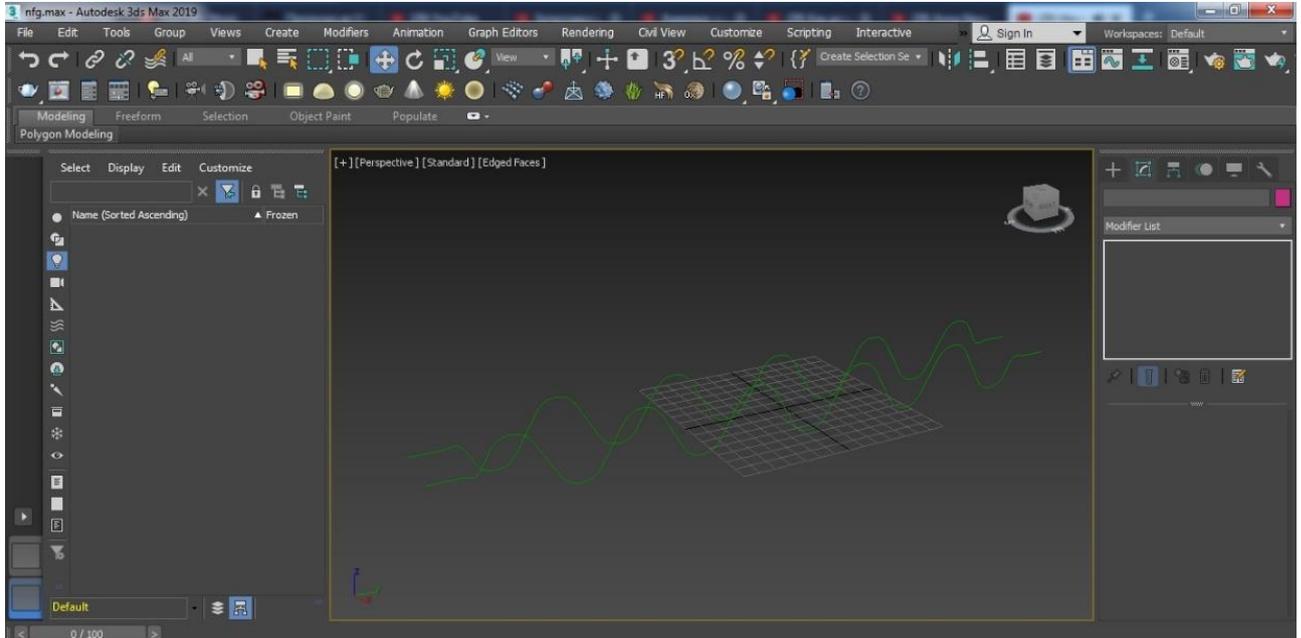


Рисунок 3.8 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 6.

- 7) Создать фигуру Star с параметрами: Radius 30 единиц, Points 6 единиц (рисунок 3.9).

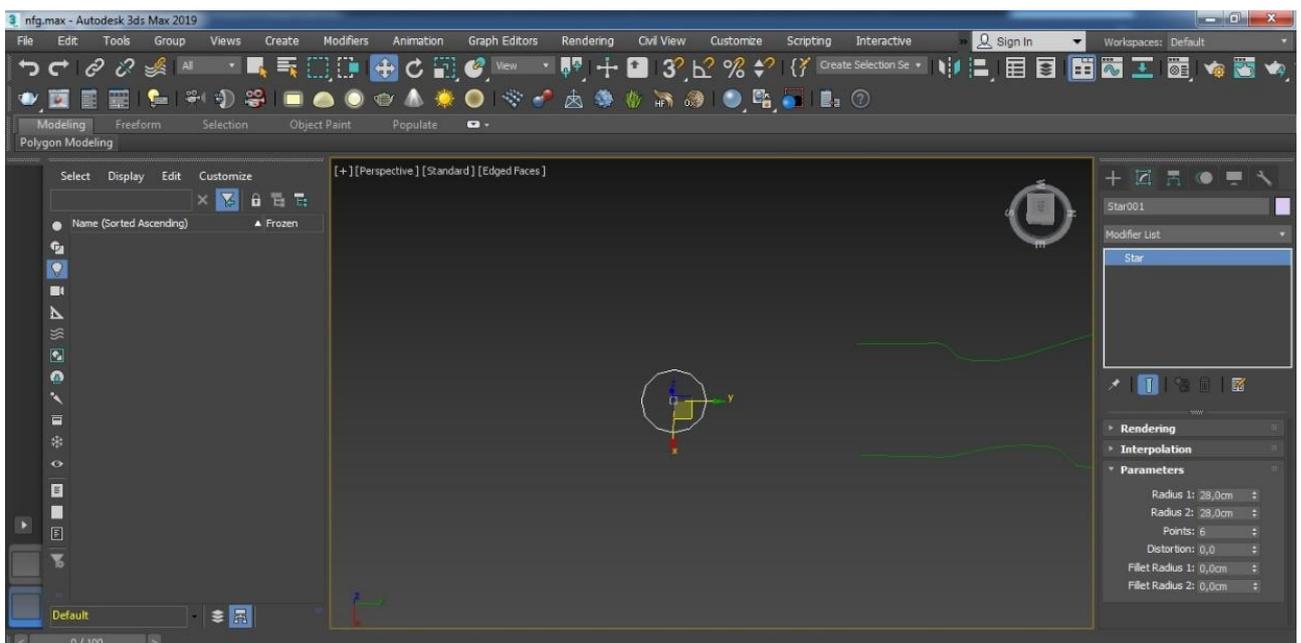


Рисунок 3.9 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 7.

- 8) Создать 2 копии получившейся фигуры, расположить с наложением друг на друга (рисунок 3.10).

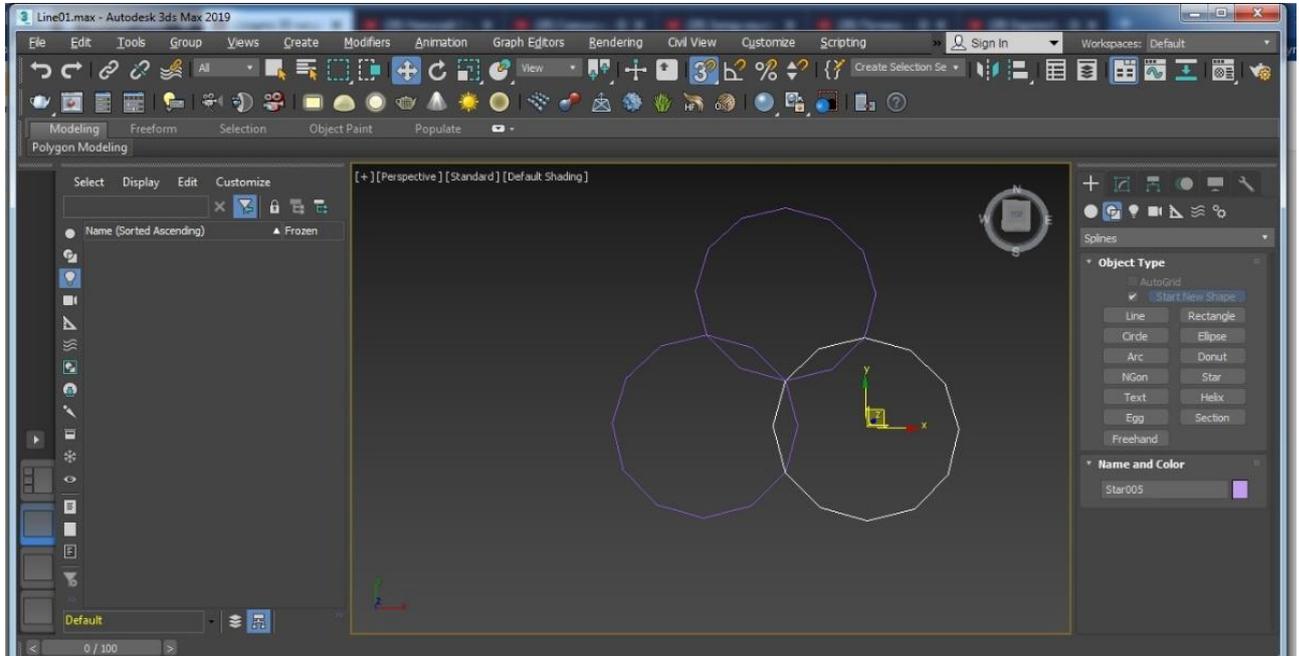


Рисунок 3.10 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 8.

- 9) Выделить получившиеся цилиндры и по нажатию правой кнопки применить Convert to → Convert to editableSpline (рисунок 3.11).

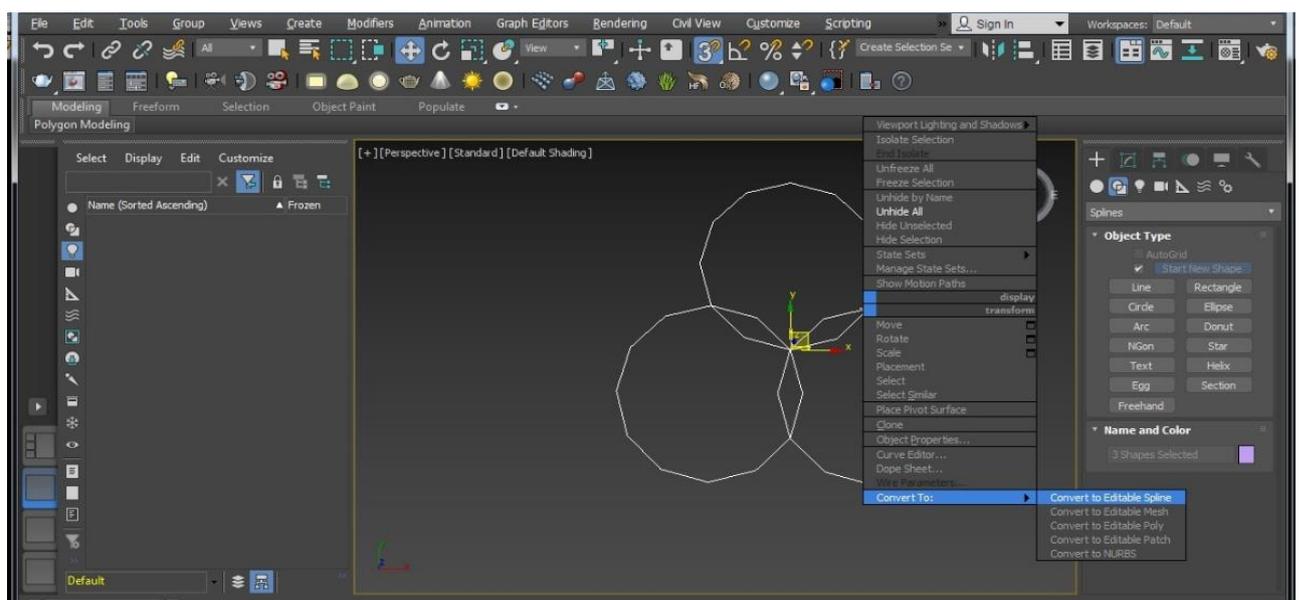


Рисунок 3.11 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 9.

- 10) Выделить одну из фигур и во вкладке EditGeometry при помощи инструмента Attach дополнить фигуру остальными цилиндрами (рисунок 3.12).

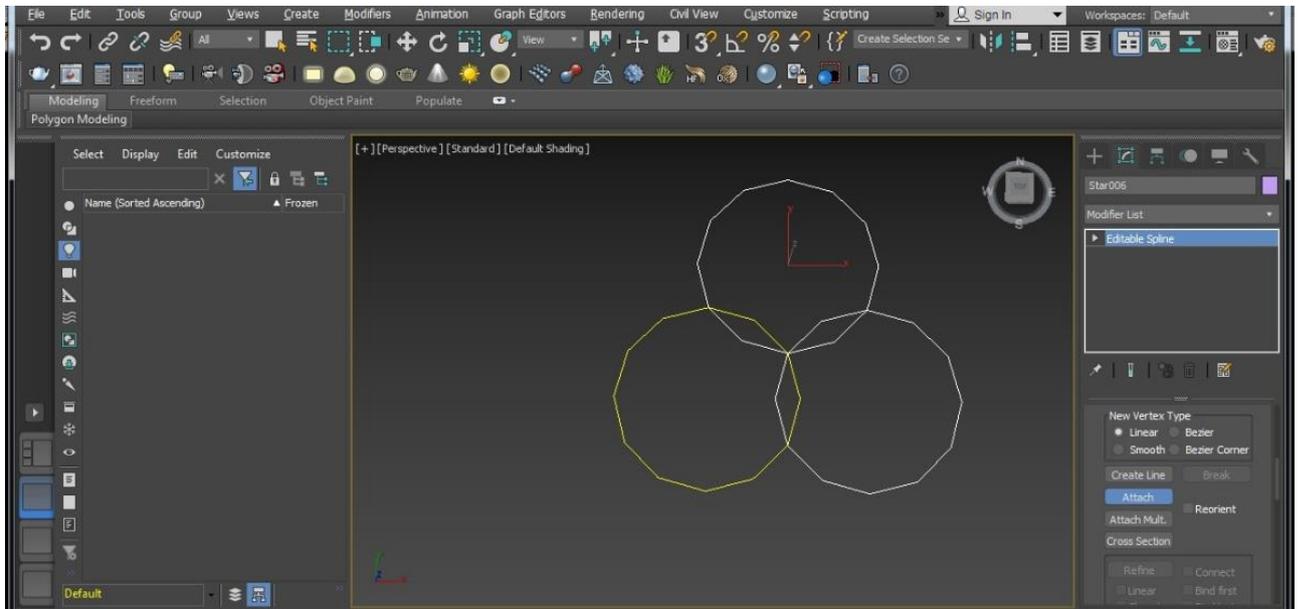


Рисунок 3.12 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 10.

- 11) Перейти к редактированию Segments, выделить центральные сегменты и удалить (рисунок 3.13).

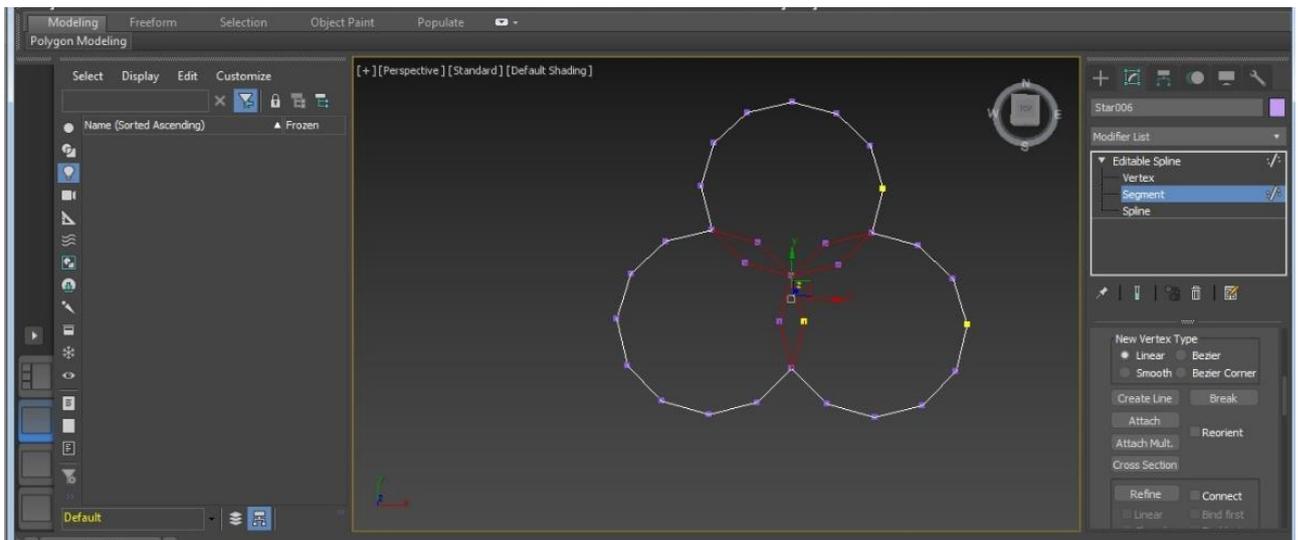


Рисунок 3.13 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 11.

12) В режиме редактирования Vertex, выделить поочередно освободившиеся вершины и объединить попарно при помощи Weld (рисунок 3.14).

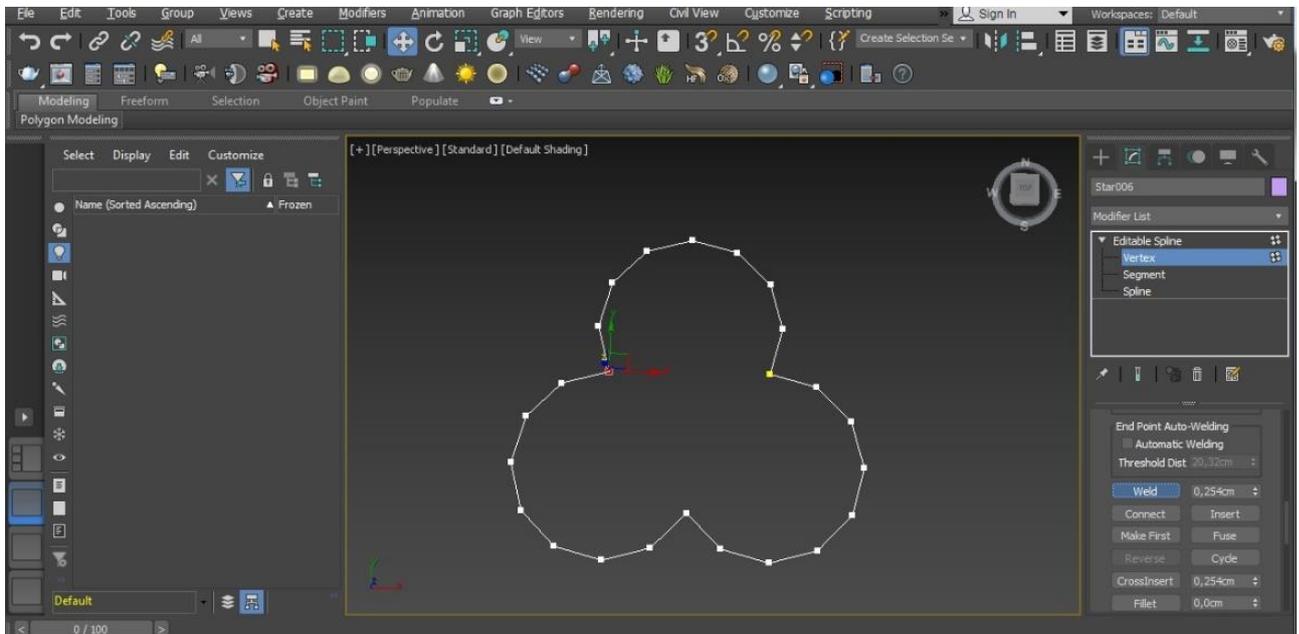


Рисунок 3.14 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 12.

13) Перейти к редактированию фигуры, затем на вкладку Hierarchy. Нажать Pivot → Attach Pivot Only → Center to Object (рисунок 3.15).

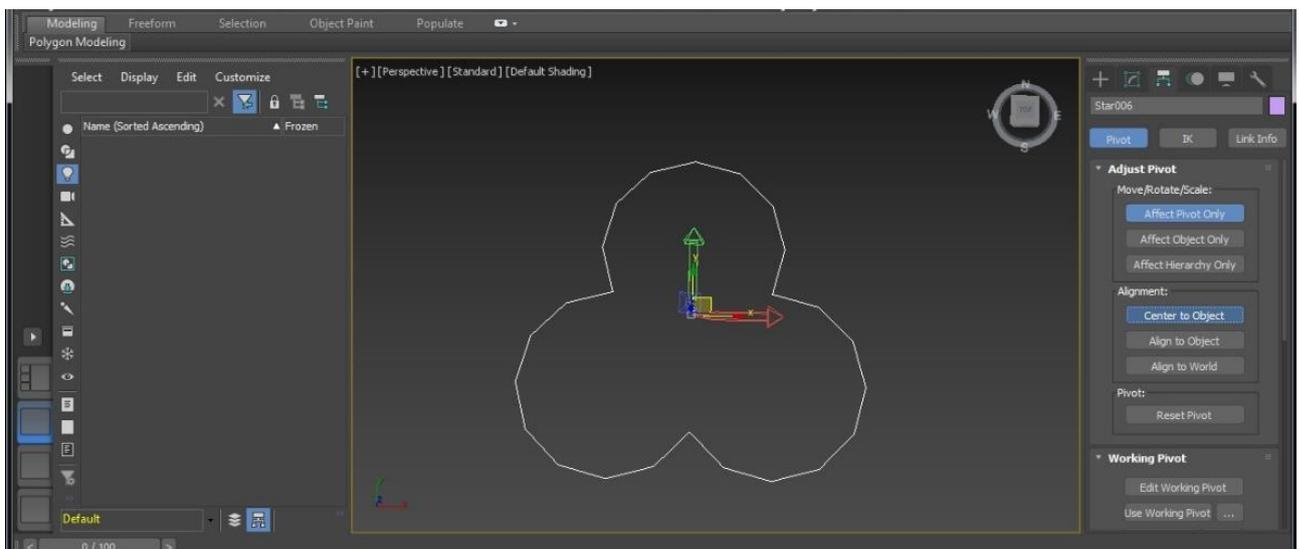


Рисунок 3.15 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 13.

- 14) Выделить ранее созданный Line, затем создать Compound Objects → Loft (рисунок 3.16).

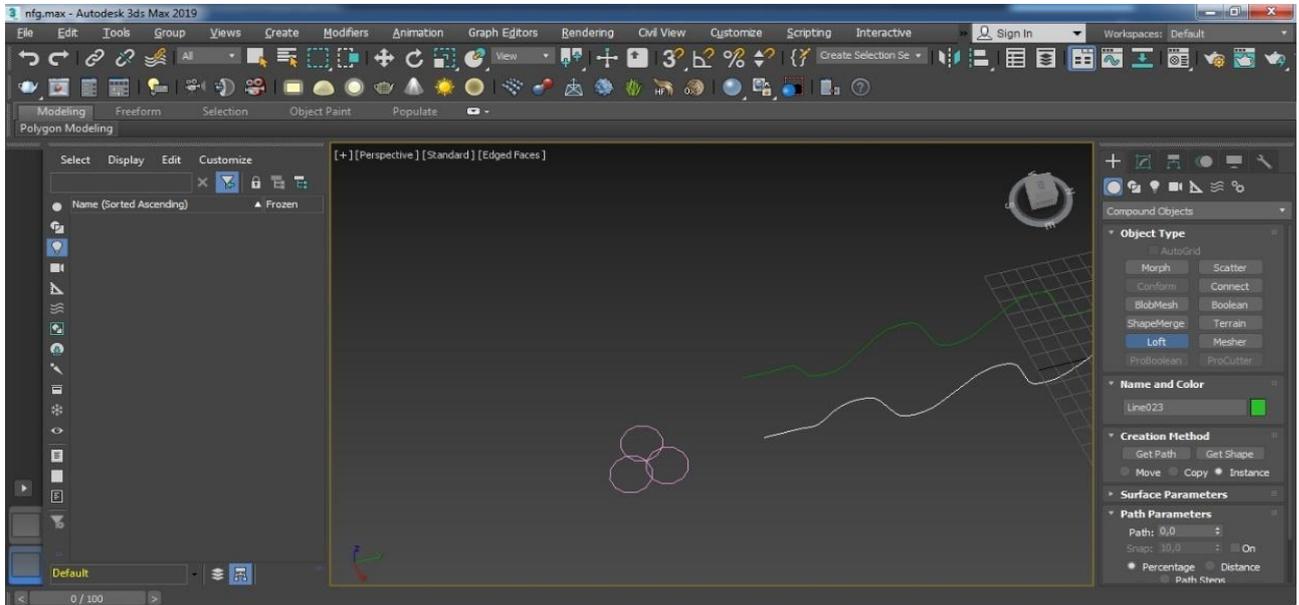


Рисунок 3.16 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 14.

- 15) Нажать GetShape и выбрать созданную фигуру во второй части (рисунок 3.17).

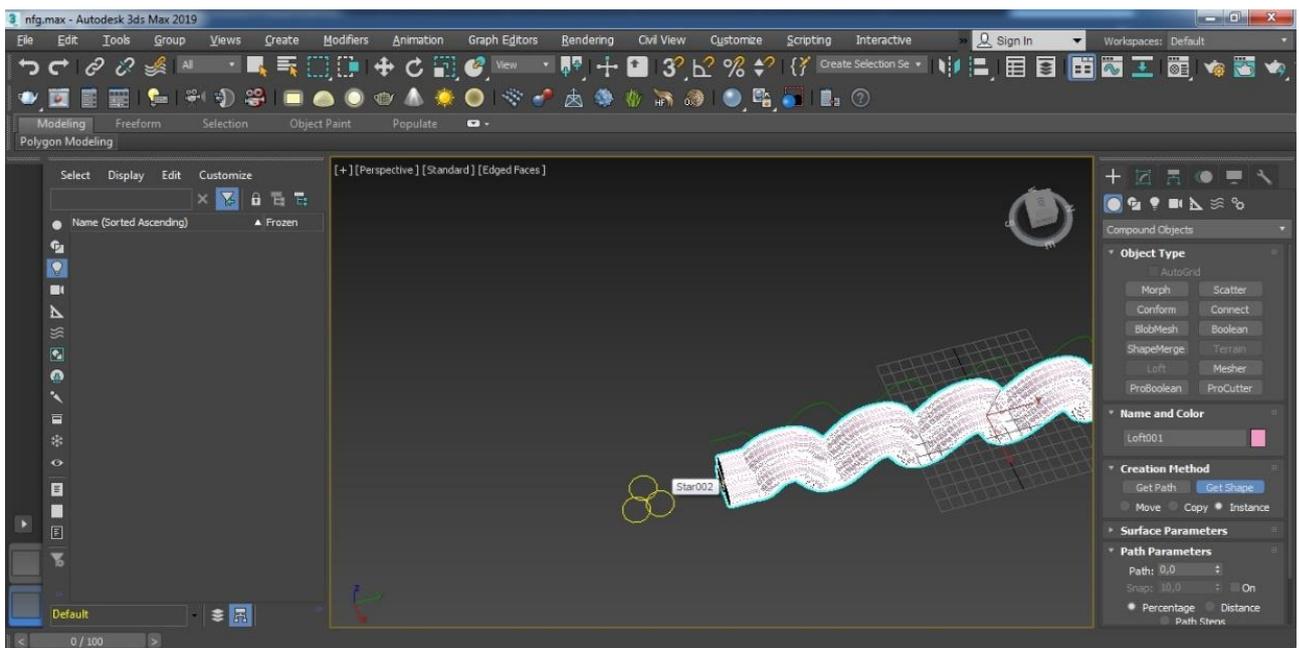


Рисунок 3.17 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 15.

- 16) Снять отметку в поле Skin parameters → Options → Contour для корректного использования дальнейших модификаторов (рисунок 3.18).

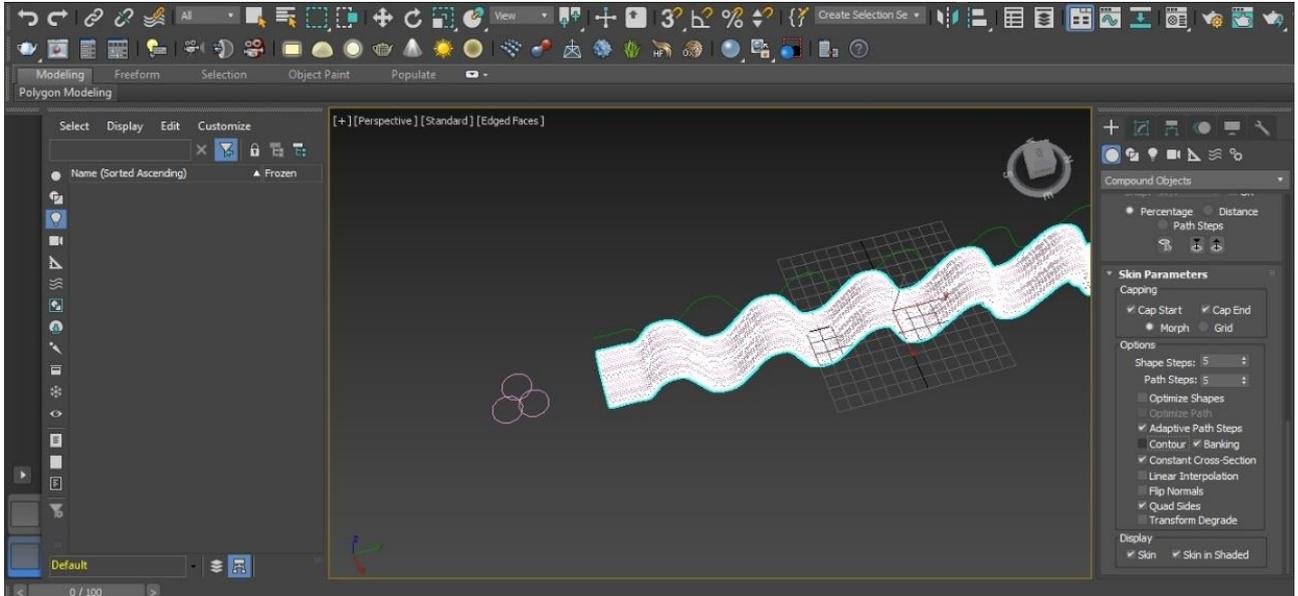


Рисунок 3.18 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 16.

- 17) Выбрать получившийся объект и на вкладке Deformations выбрать Twist. Откроется дополнительное окно с графиком. Потянуть конец графика вверх, затем изменить значение поля внизу на 2000 единиц (рисунок 3.19).

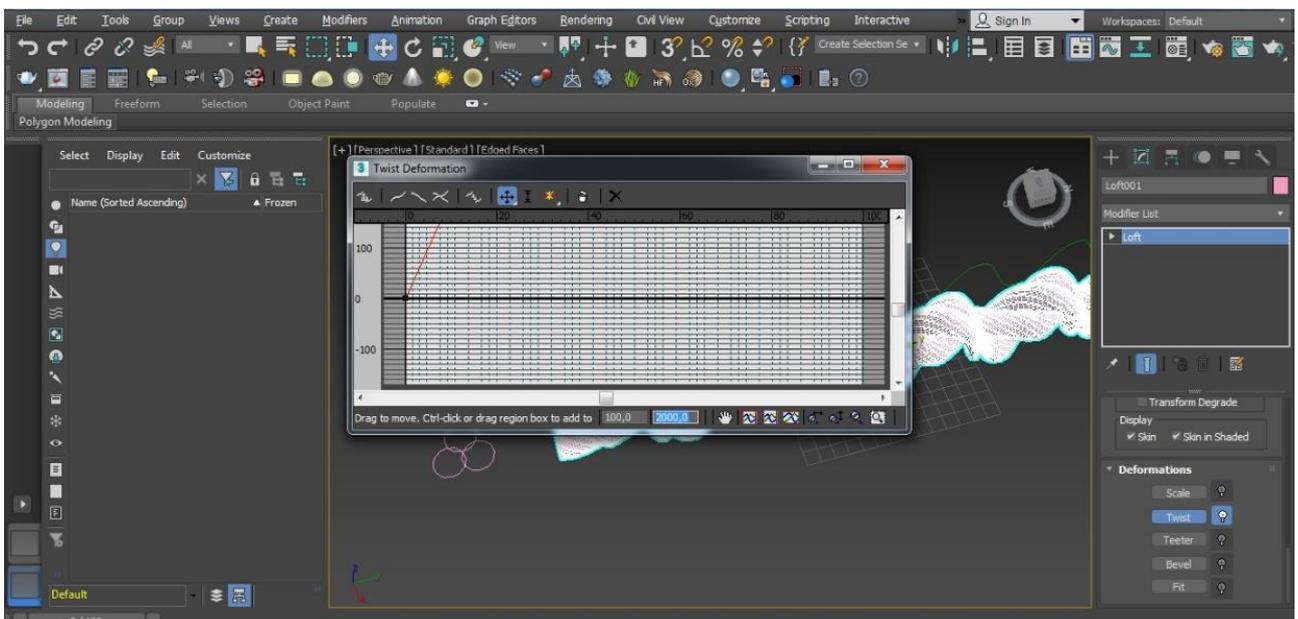


Рисунок 3.19 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 17.

18) Повторить создание Loft для второй Line (рисунок 3.20).

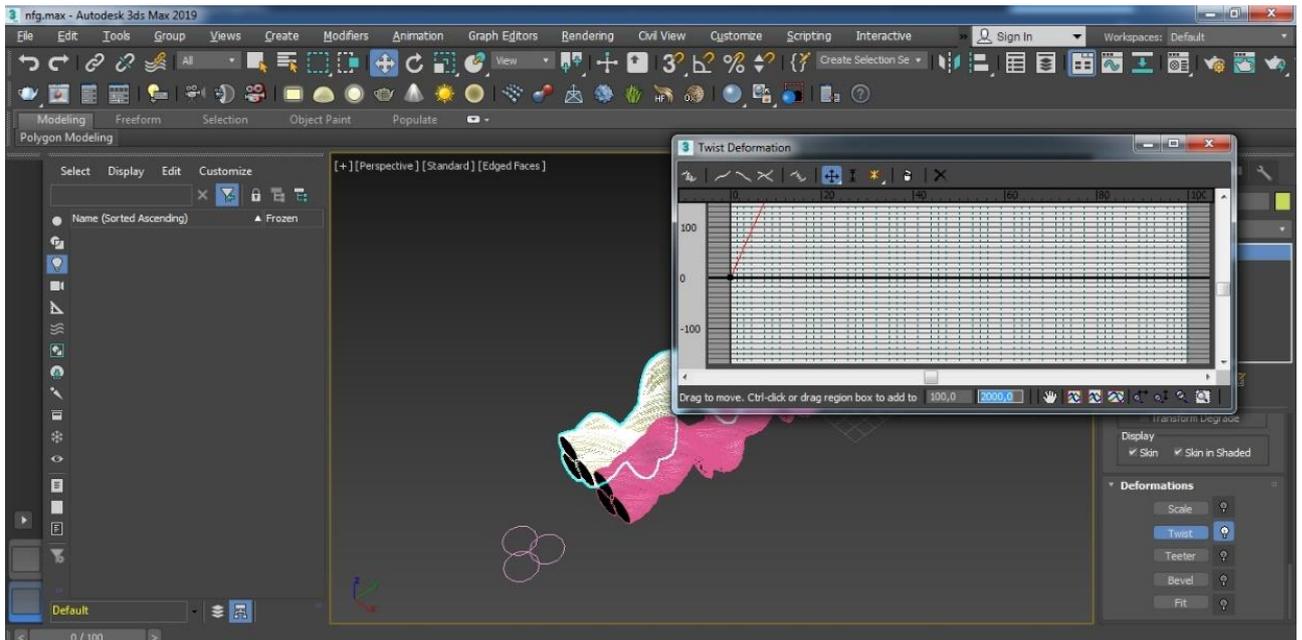


Рисунок 3.20 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 18.

19) Создать копию 5 фигур Loft и объединить в группу (рисунок 3.21).

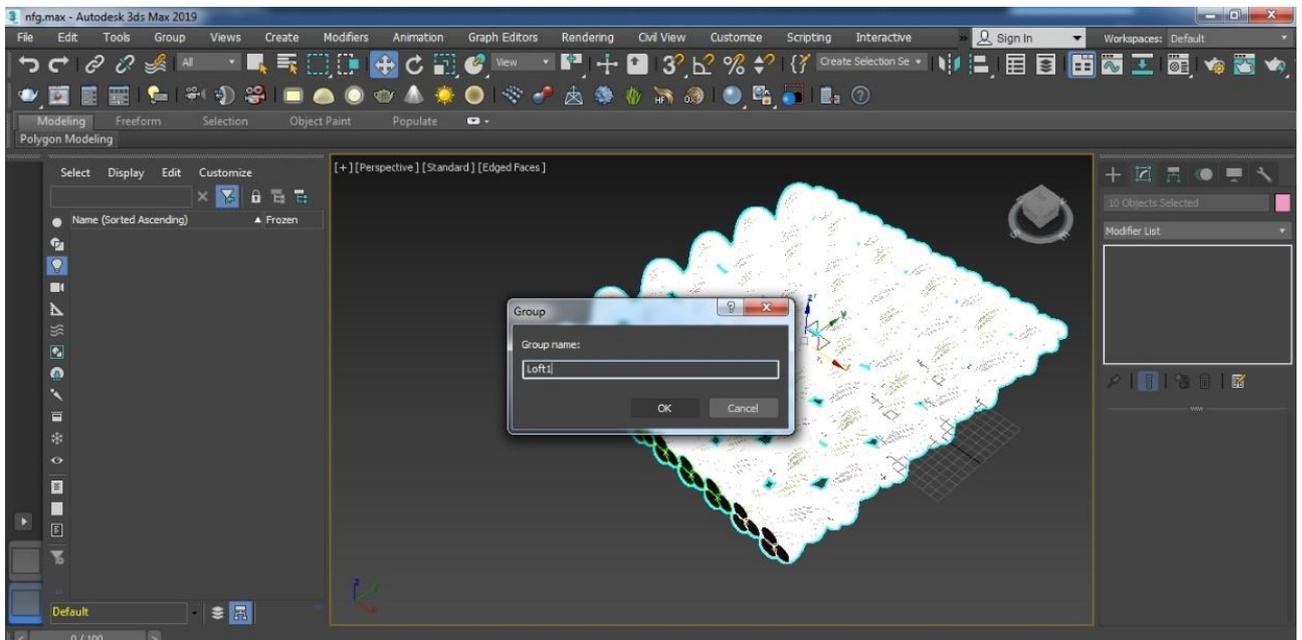


Рисунок 3.21 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 19.

- 20) Дублировать получившуюся группу и развернуть ее по осям: $X=180^\circ$, $Z=90^\circ$; затем снять группировки (рисунок 3.22).

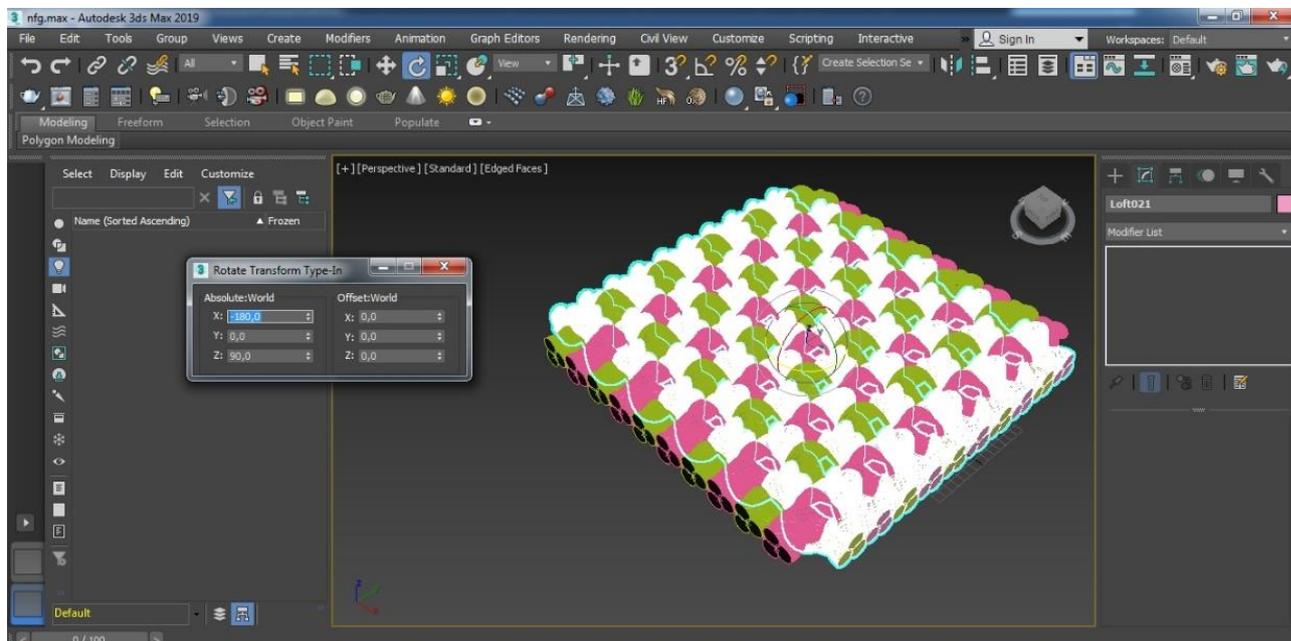


Рисунок 3.22 – Проектирование ткацкого переплетения, шаг 20.

Выбранная группа объектов экспортируется для ретопологии в программе Blender. Указанное действие не является частью процесса проектирования ткацкого переплетения, но предваряет процесс создания пористой структуры. Все визуализации тканых структур представлены в Приложении А, общий алгоритм действий содержится в Приложении Г (Приложение Г, рисунок Г.1).

3.2 Порядок получения тканой пористой структуры

После применения функции ретопологии в программе Blender структуру объектов снова следует открыть в программе 3Ds MAX и выполнить материализацию цифрового пористого пространства. Рендеры пористых структур заявленных переплетений представлены в Приложении Б.

- 1) Дополнить группу объектов фигурой Вохс параметрами Length 1000, Width 1000, Height 80, расположенной в центре массива нитей (рисунок 3.23).

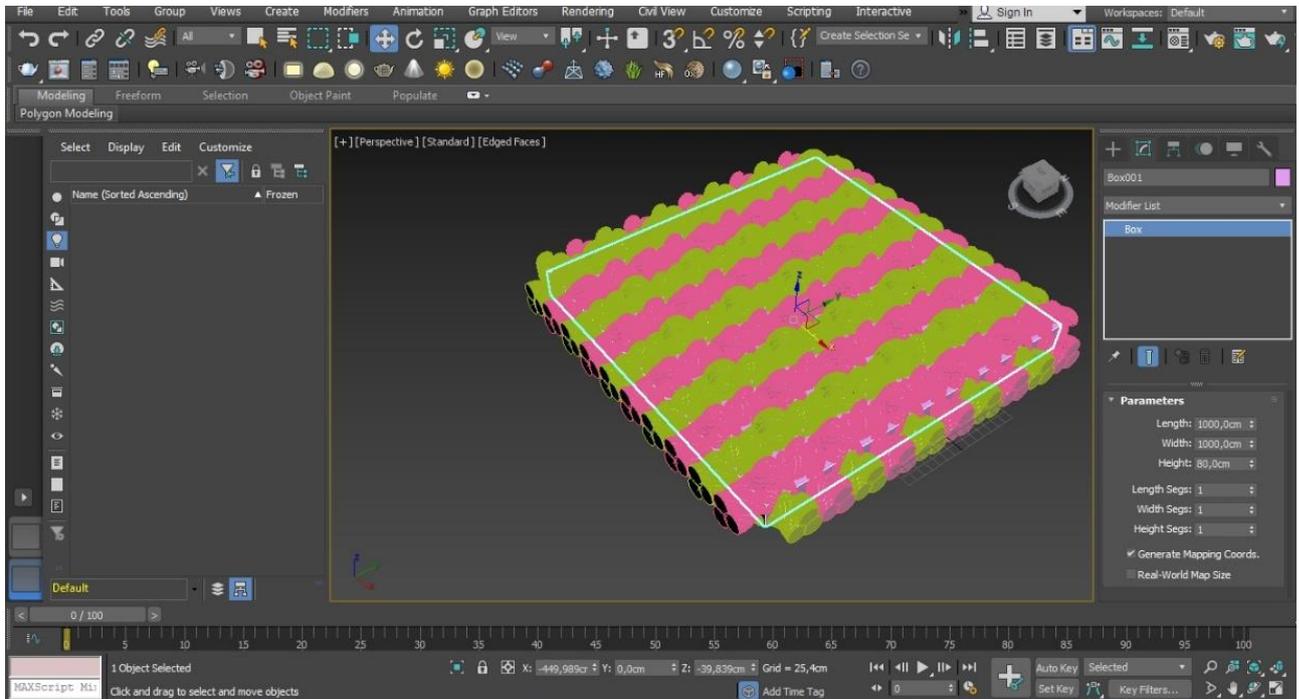


Рисунок 3.23 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 1

- 2) Выделить все фигуры и выполнить функцию Subtraction (A-B) / Subtraction (B-A) инструмента-модификатора ProBoolean.
- 3) Выделить получившуюся форму пустот и конвертировать её в Editable Mesh (рисунок 3.24).

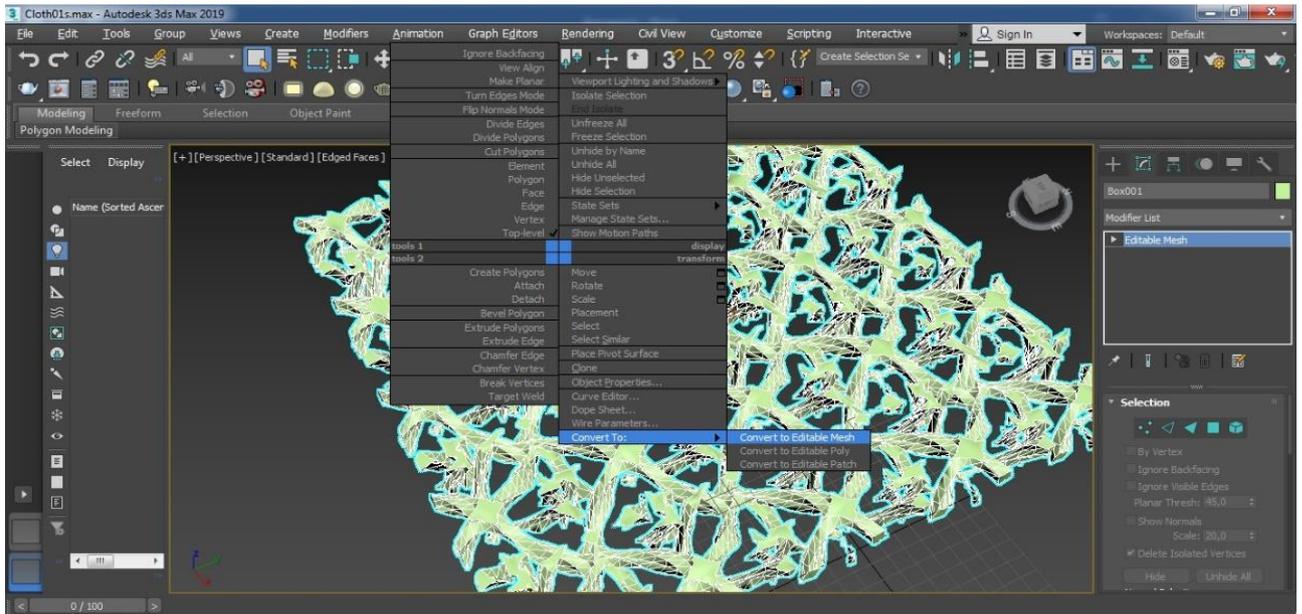


Рисунок 3.24 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 3

- 4) На панели опций объекта выбрать Selection – Element (рисунок 3.25).

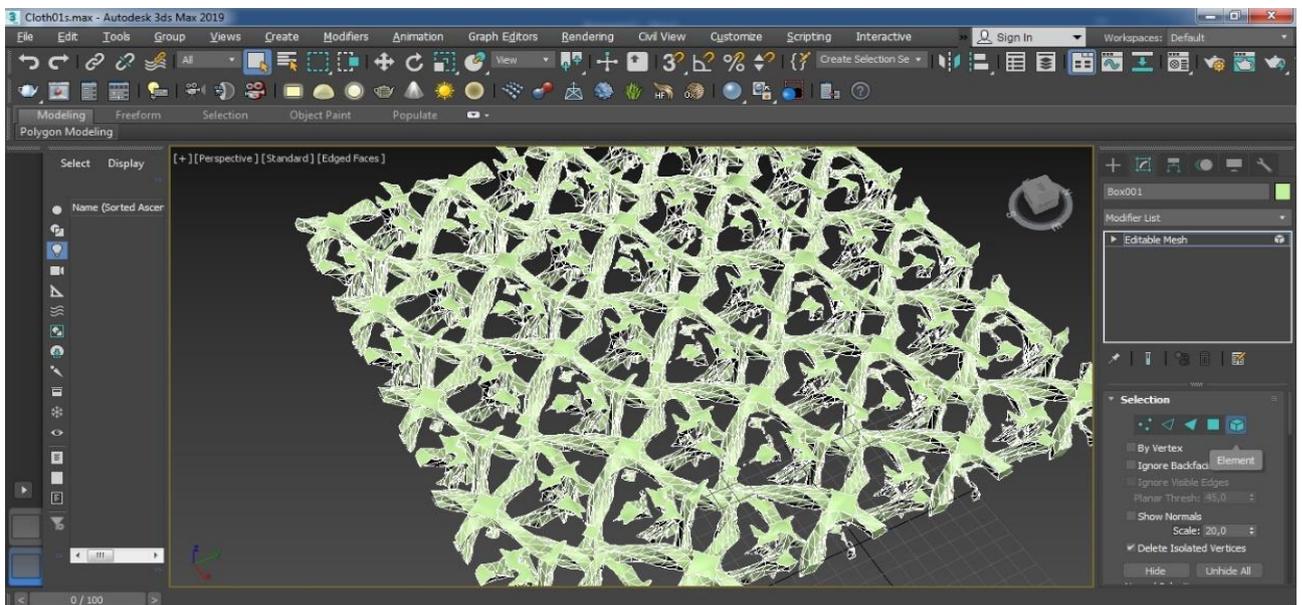


Рисунок 3.25 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 4

- 5) Выбрать вручную не относящиеся к основному объекту элементы (рисунок 3.26).

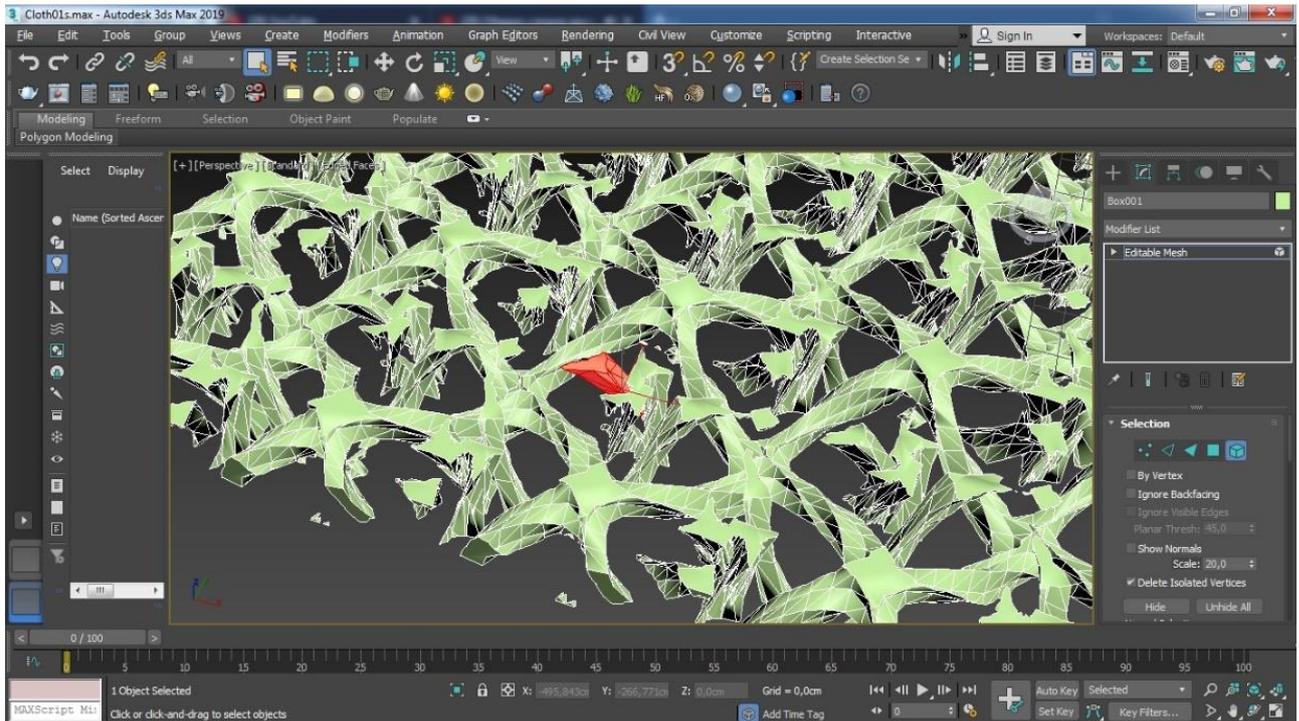


Рисунок 3.26 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 5

- б) В панели Edit Geometry выбрать функцию Detach (рисунок 3.27).

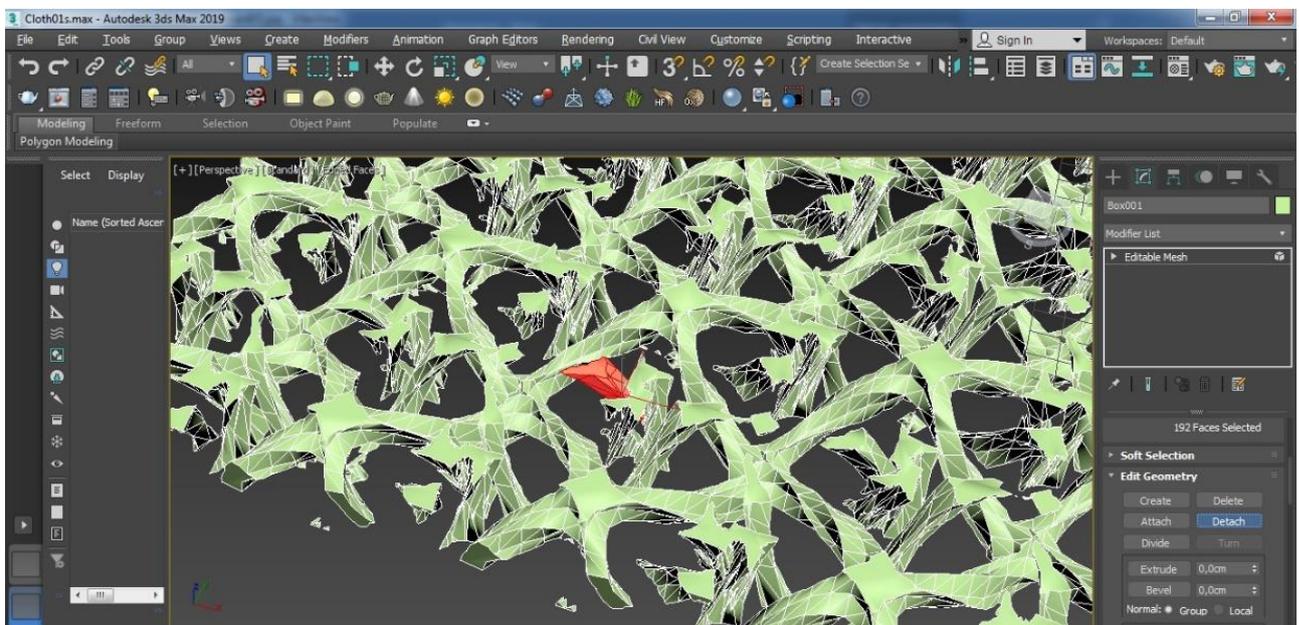


Рисунок 3.27 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 6

- 7) Определить имя нового объекта (рисунок 3.28).

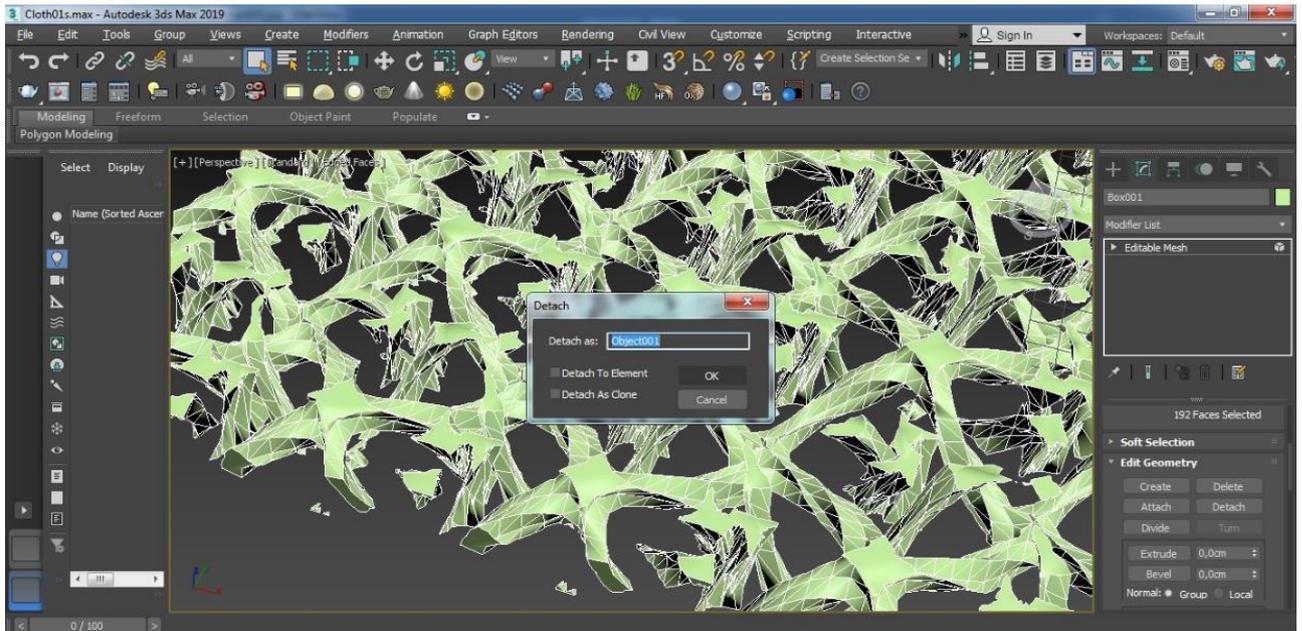


Рисунок 3.28 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 7

8) Такую же процедуру совершить для остальных объектов в сегменте. Для удобства отображения можно выбрать иную расцветку для новых объектов (рисунок 3.29).

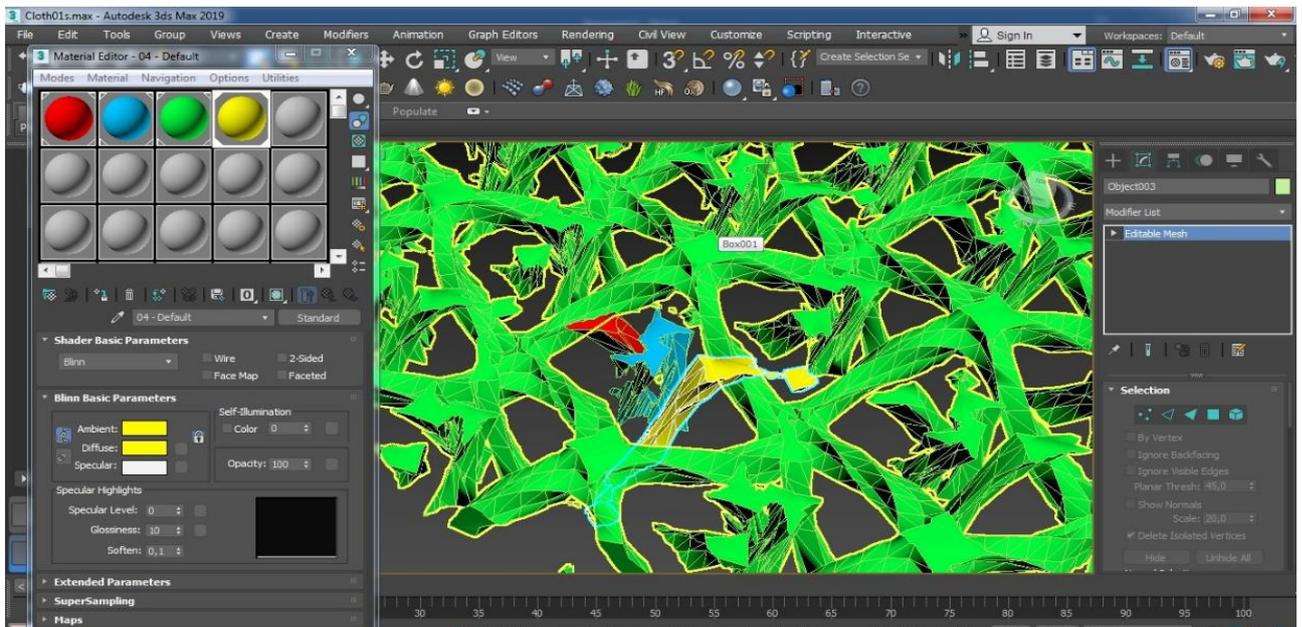


Рисунок 3.29 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 8

- 9) Создать фигуру Box с параметрами для того, чтобы отсечь повторяющиеся элементы (рисунок 3.30).

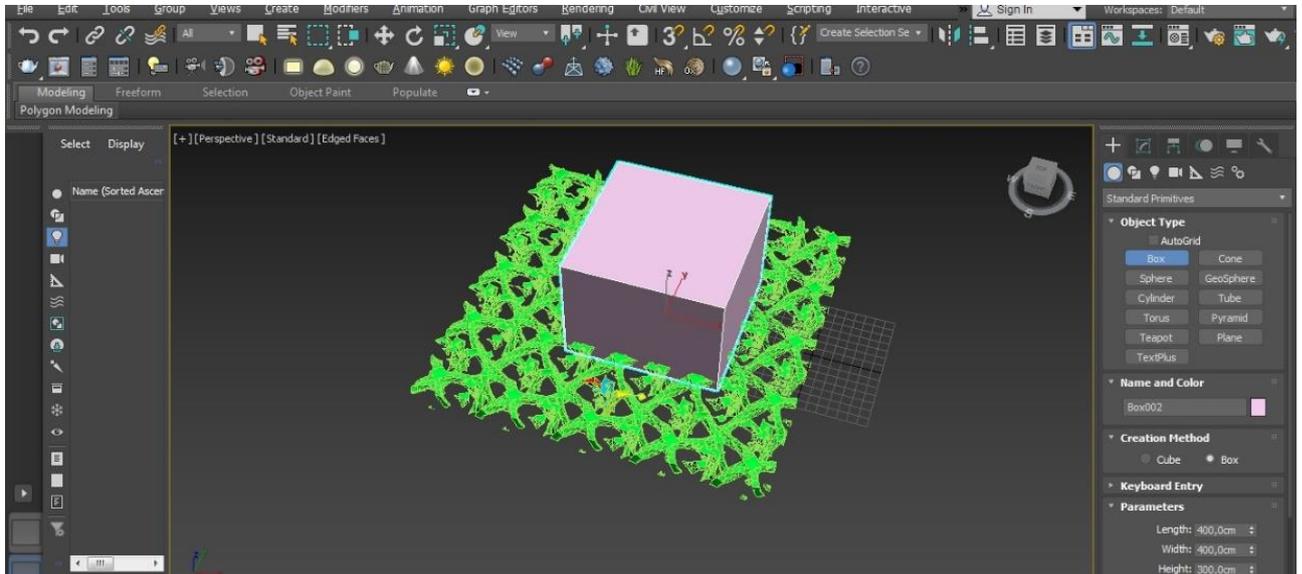


Рисунок 3.30 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 9

- 10) Разместить Box в центре объекта (рисунок 3.31).

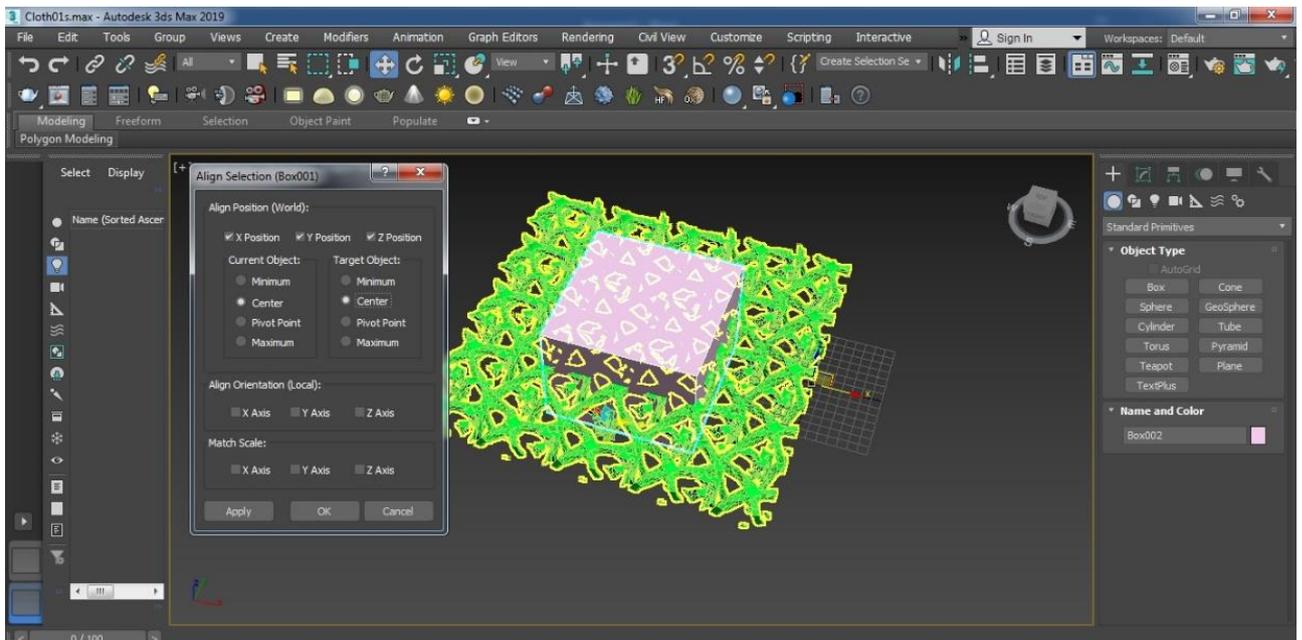


Рисунок 3.31 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 10

- 11) Конвертировать Box в EditablePoly (рисунок 3.32).

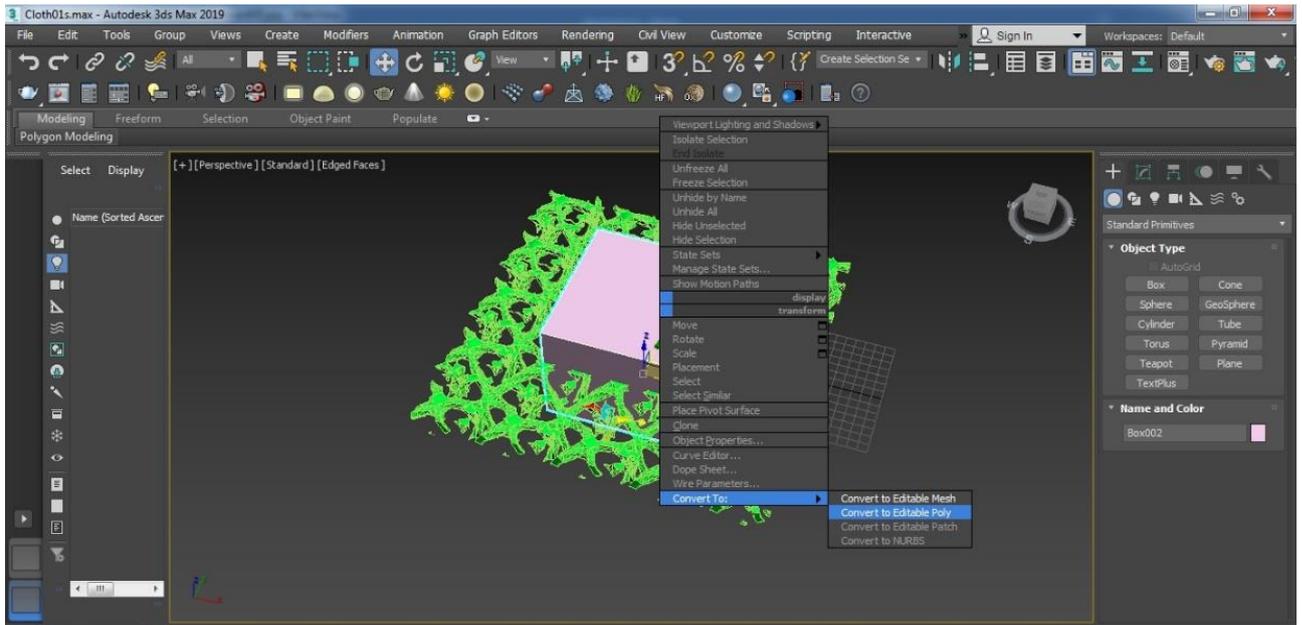


Рисунок 3.32 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 11

12) Во вкладке Selection выбрать редактирование polygon, выделить верхний и нижний полигоны (рисунок 3.33).

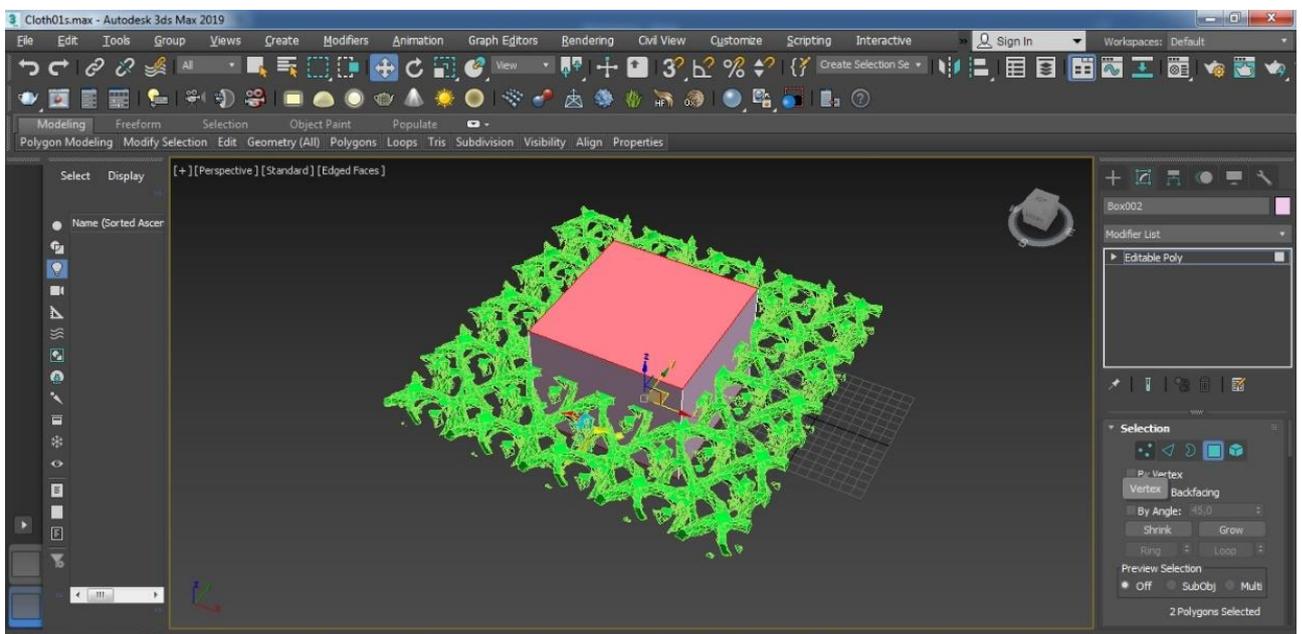


Рисунок 3.33 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 12

13) В Editpolygons выбрать Insert с параметром 100 (рисунок 3.34).

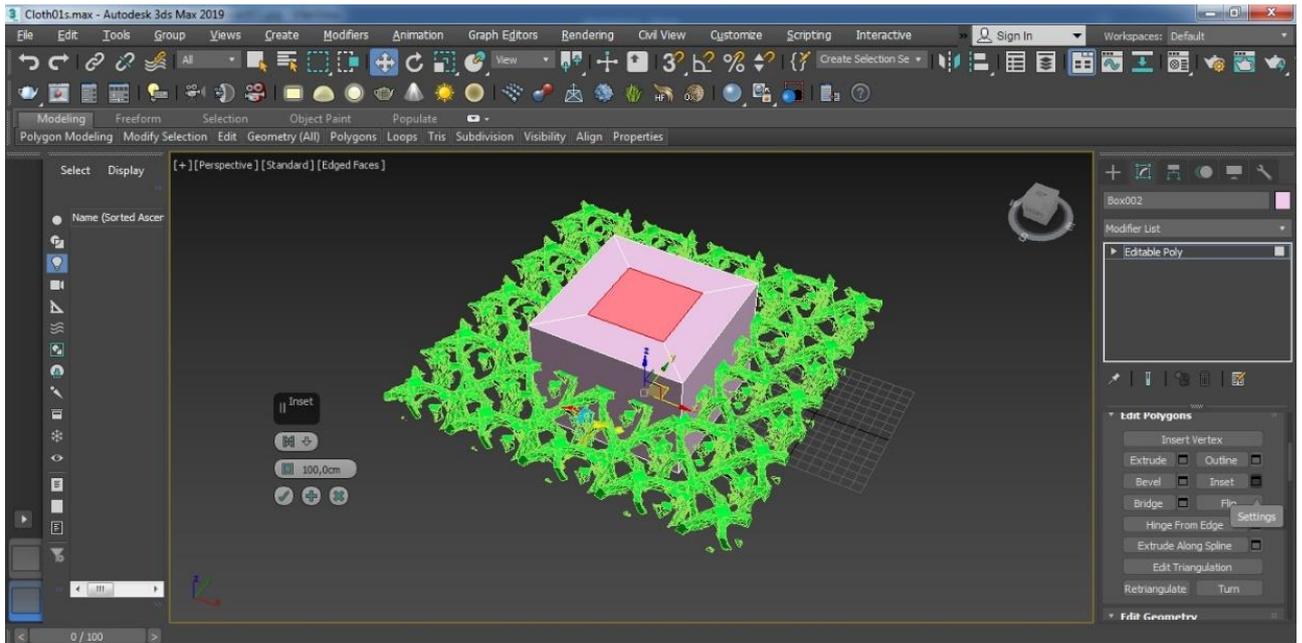


Рисунок 3.34 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 13

14) Далее на той же вкладке нажать Bridge (рисунок 3.35).

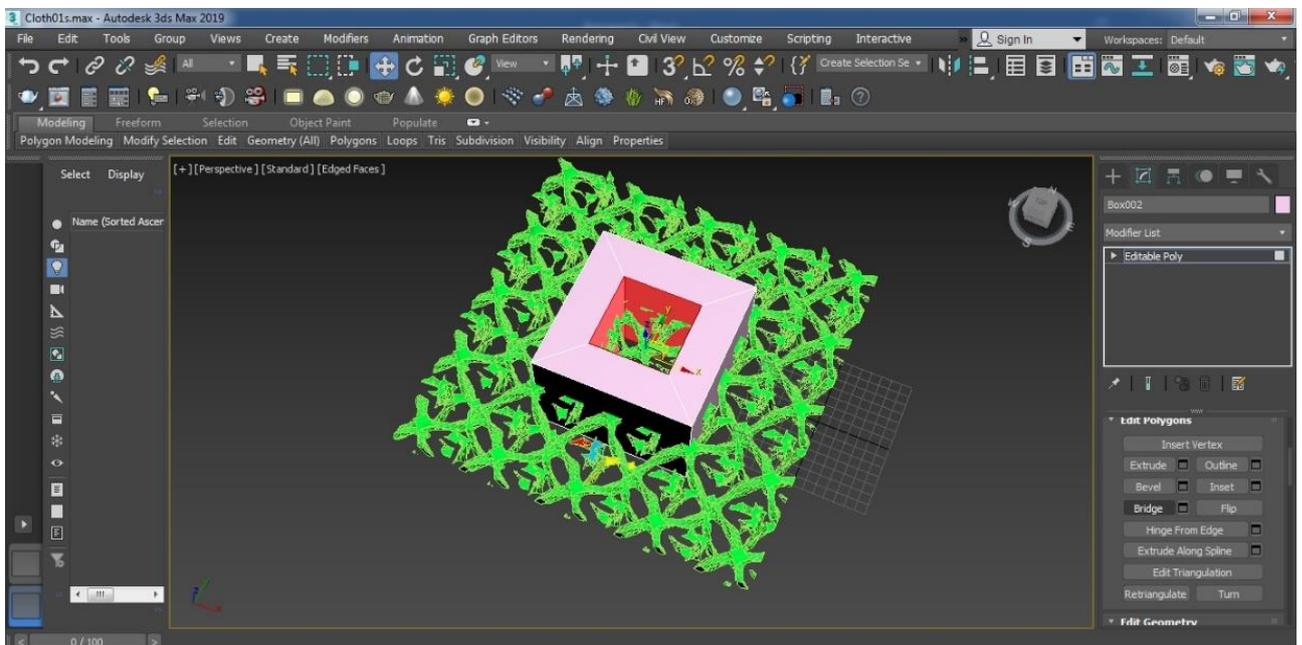


Рисунок 3.35 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 14

15) Выбрать основной объект и создать фигуру Boolean (рисунок 3.36).

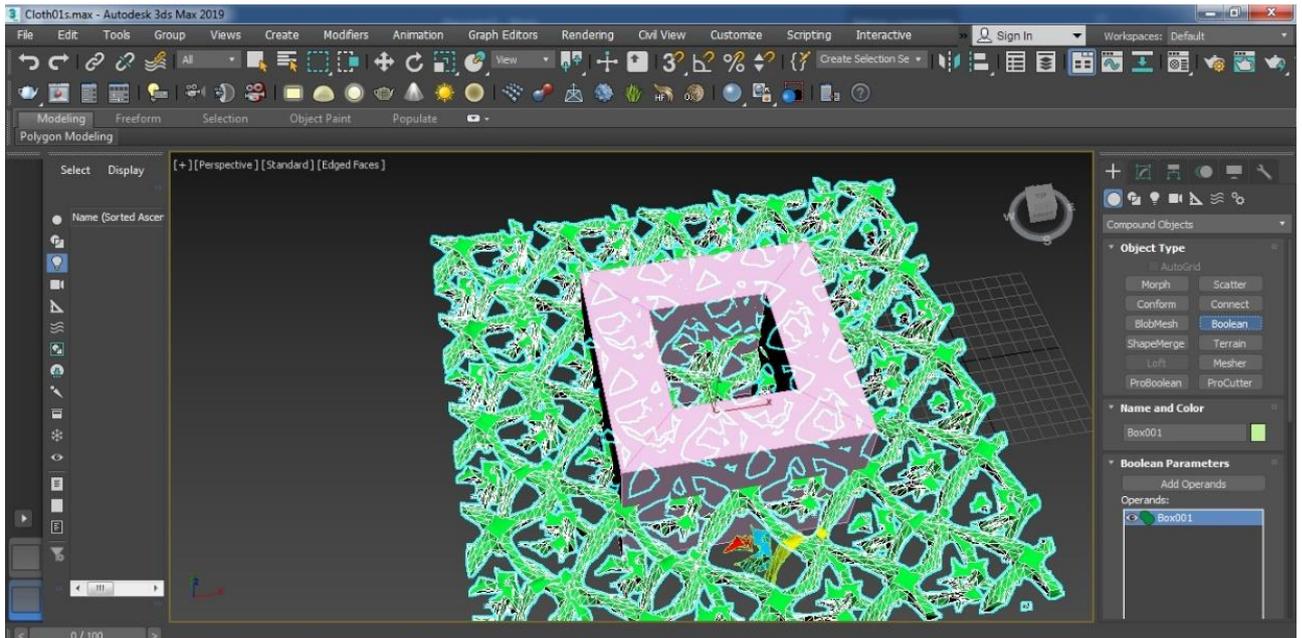


Рисунок 3.36 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 15

16) Выбрать Add operands и Box и поставить параметр Subtract (рисунок 3.37).

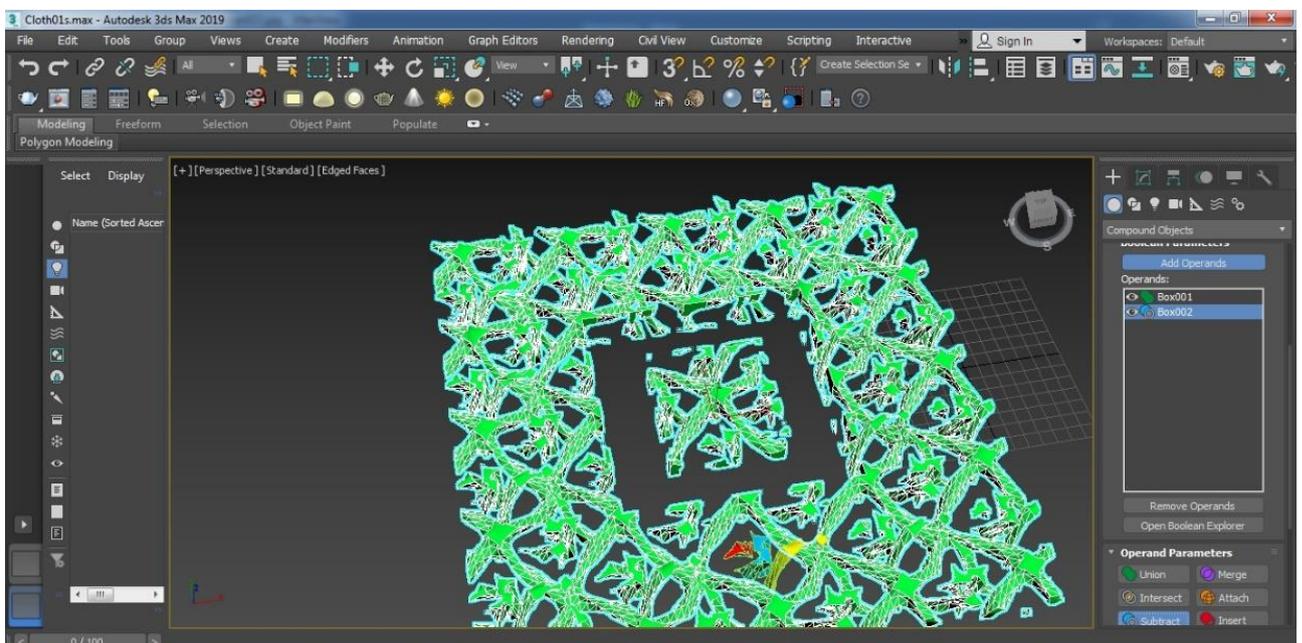


Рисунок 3.37 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 16

17) Конвертировать фигуру в Editable Mesh (рисунок 3.38).

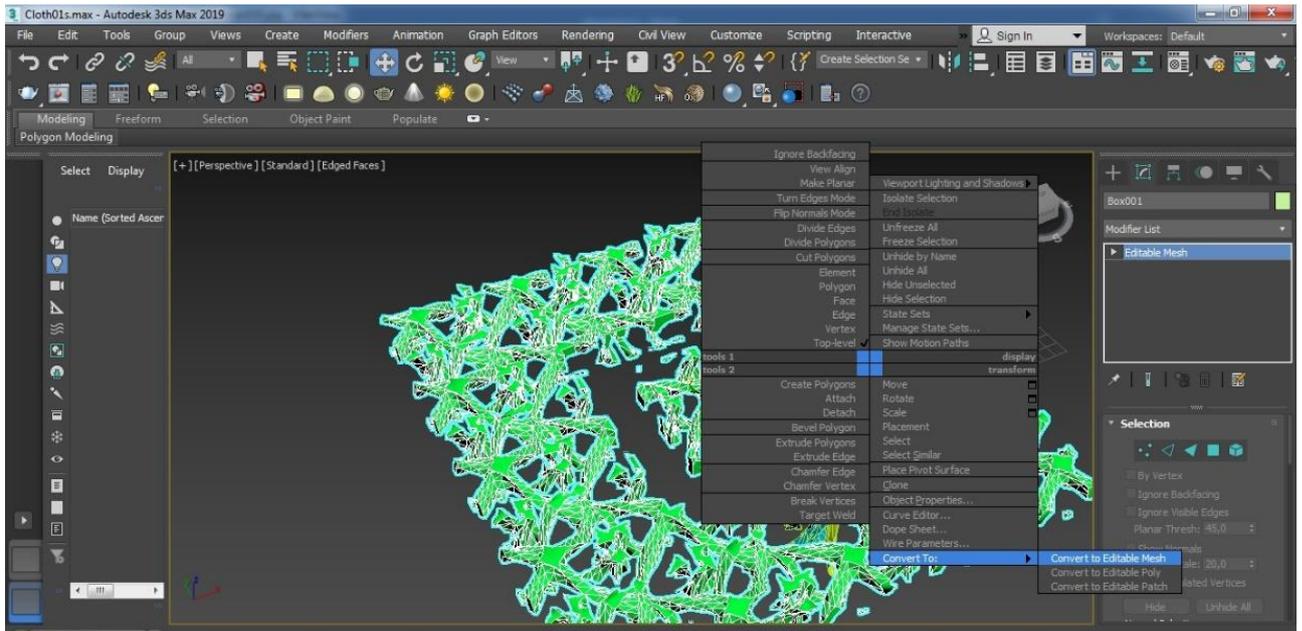


Рисунок 3.38 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 17

18) Выбрать внутреннюю фигуру посредством редактирования element и снова отделить при помощи Detach (рисунок 3.39).

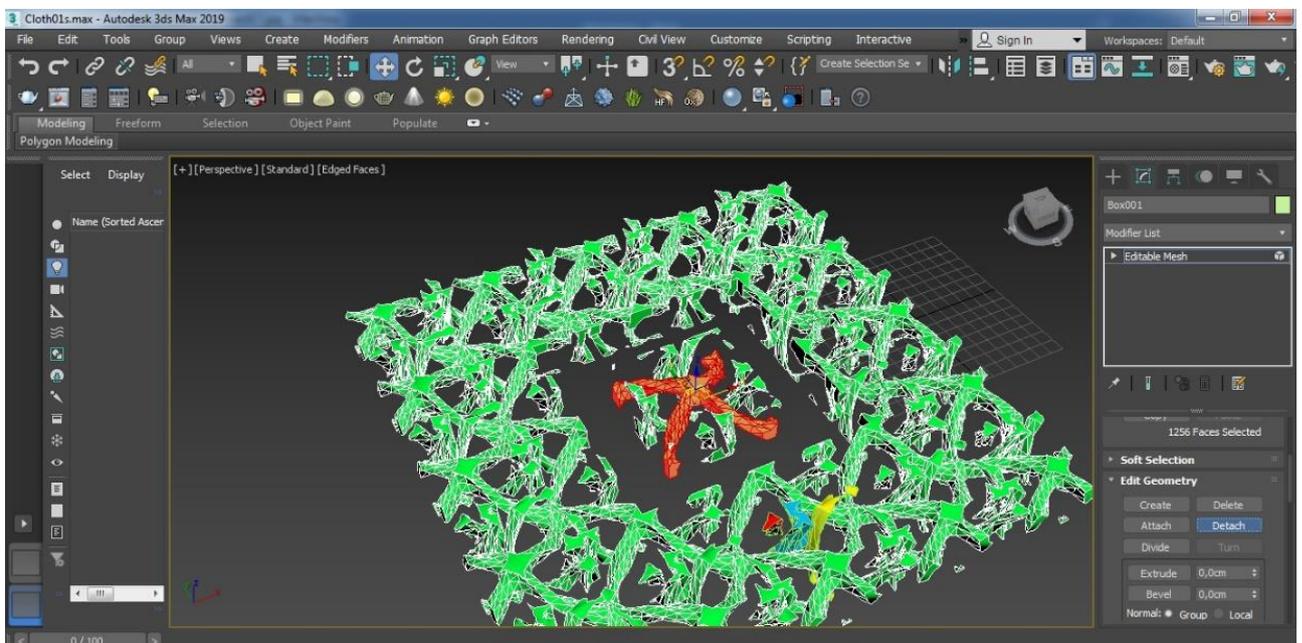


Рисунок 3.39 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 18

19) Выделить полученные фигуры и скрыть лишнее посредством Hide unselected (рисунок 3.40).

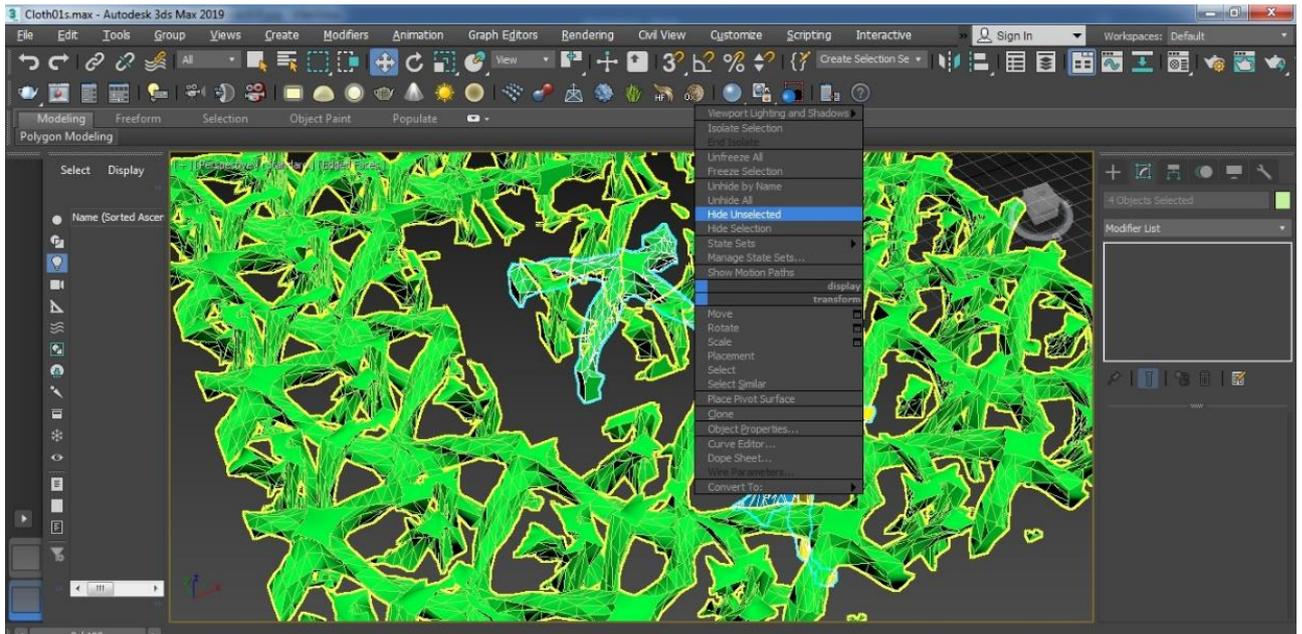


Рисунок 3.40 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 19

20) Выделив фигуру, вывести информацию о её объеме через Utilities (рисунок 3.41).

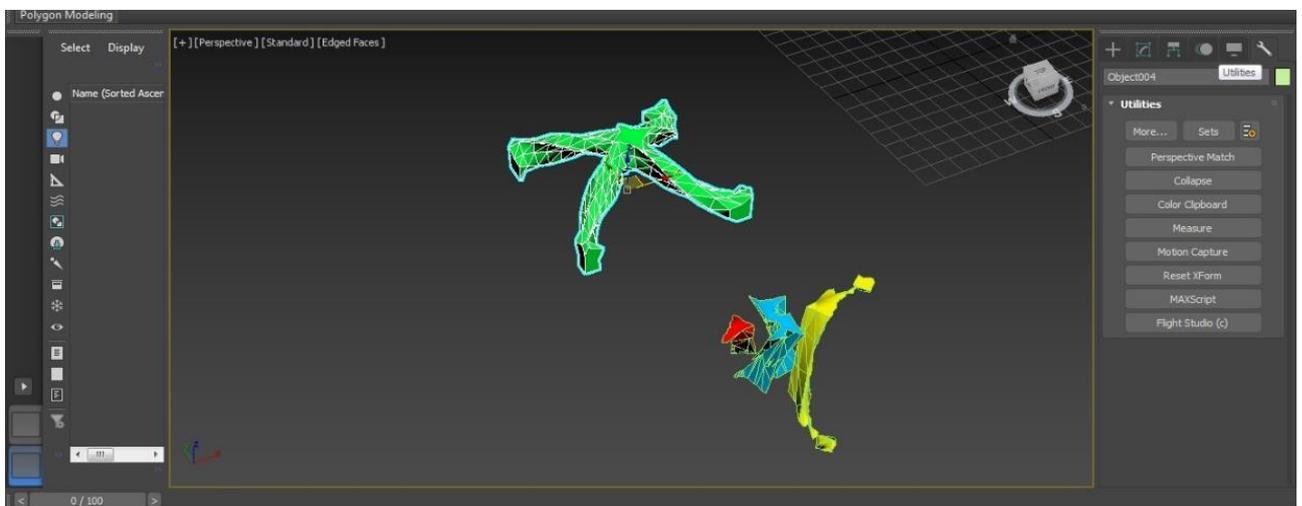


Рисунок 3.41 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 20

21) Выбрать Measure, где строка Volume показывает объем выделенной фигуры (рисунок 3.42). Данный параметр доступен для любого выделенного объекта.

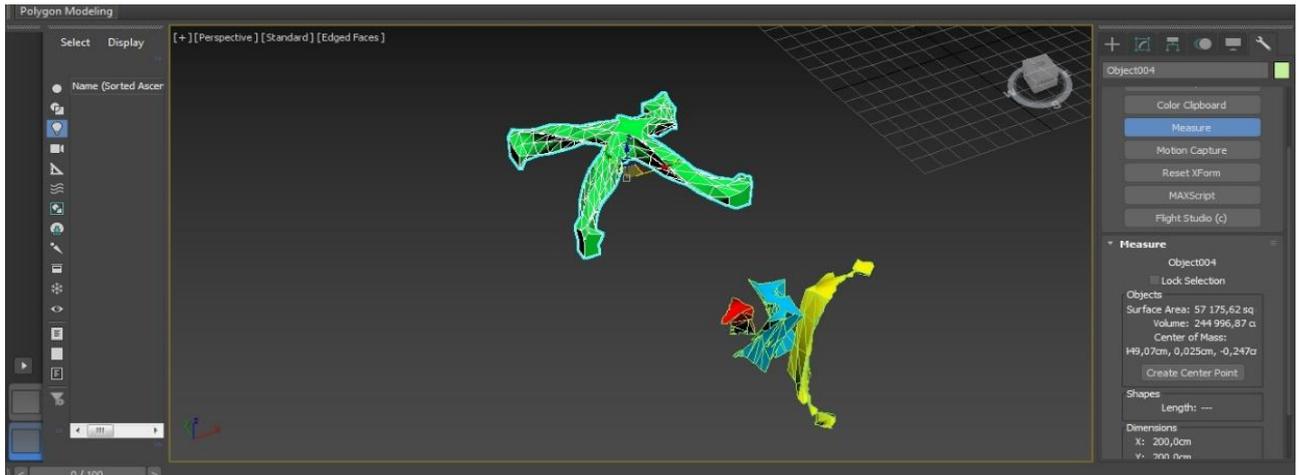


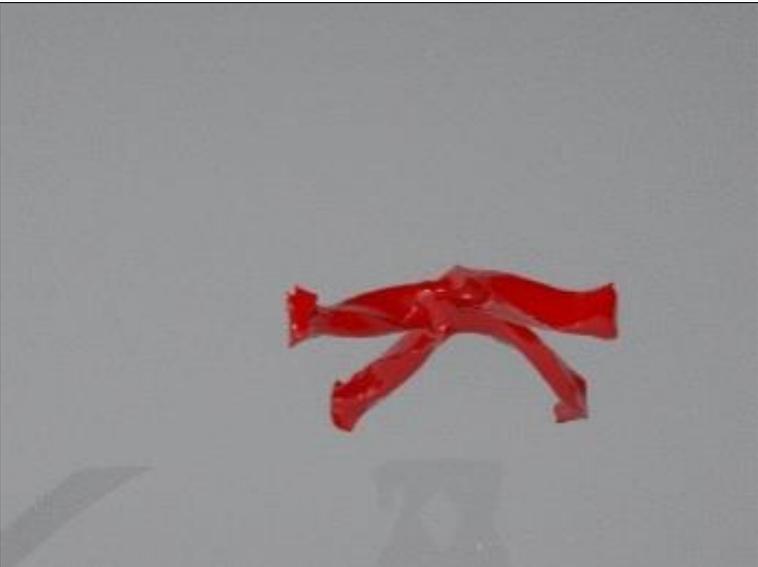
Рисунок 3.42 – Порядок получения тканой пористой структуры, шаг 21

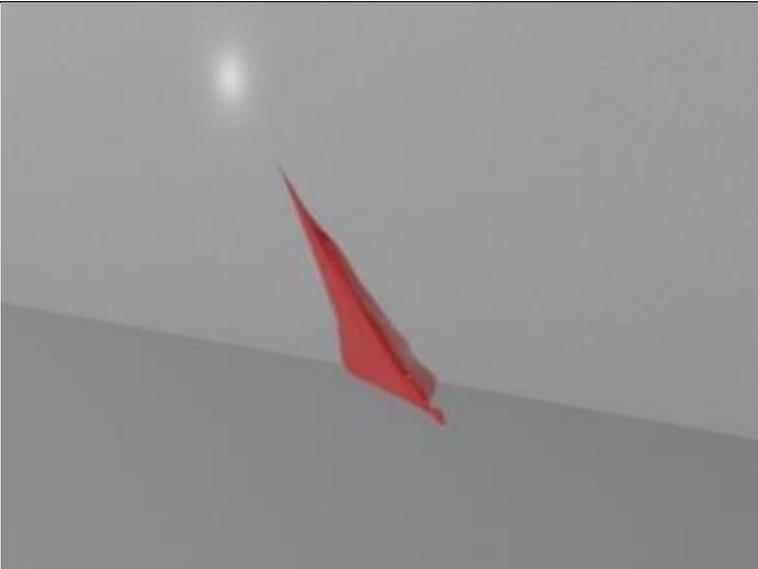
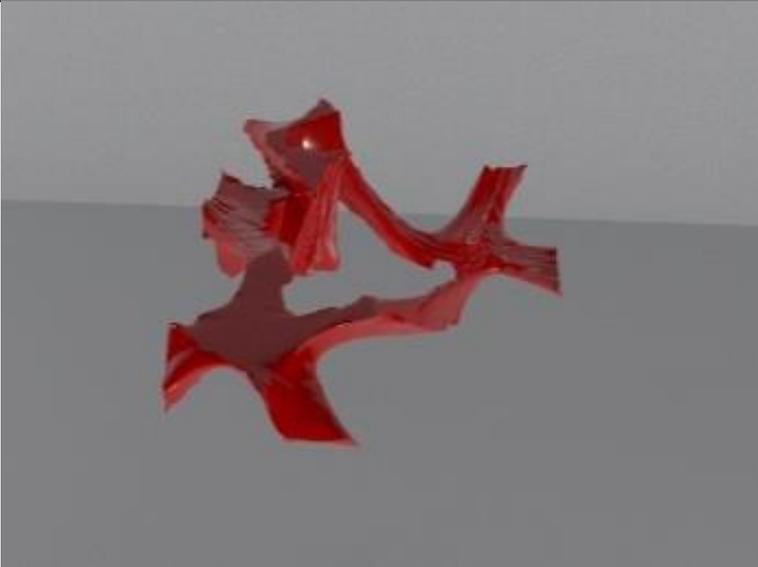
3.3 Объемы пор тканых структур и аддитивная печать образца

В работе определены объемы элементов пористой структуры тканей для выбранных видов ткацких переплетений, значения округлены до тысячных (таблица 3.1).

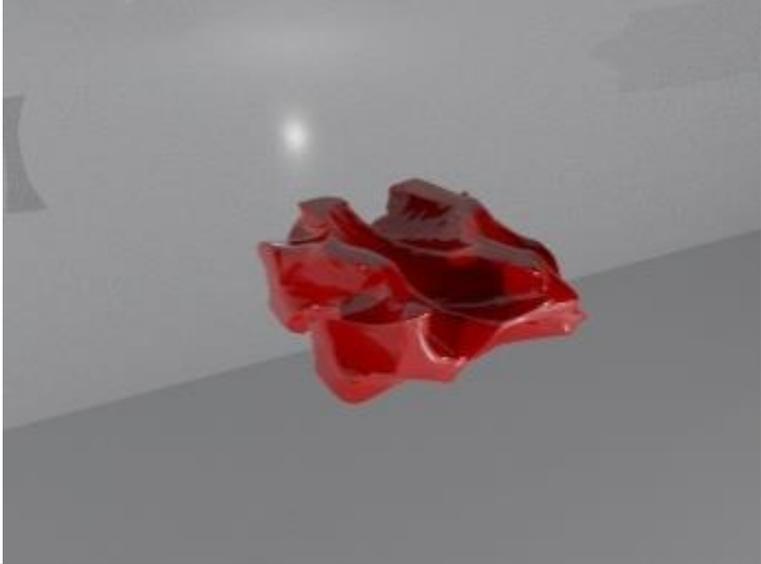
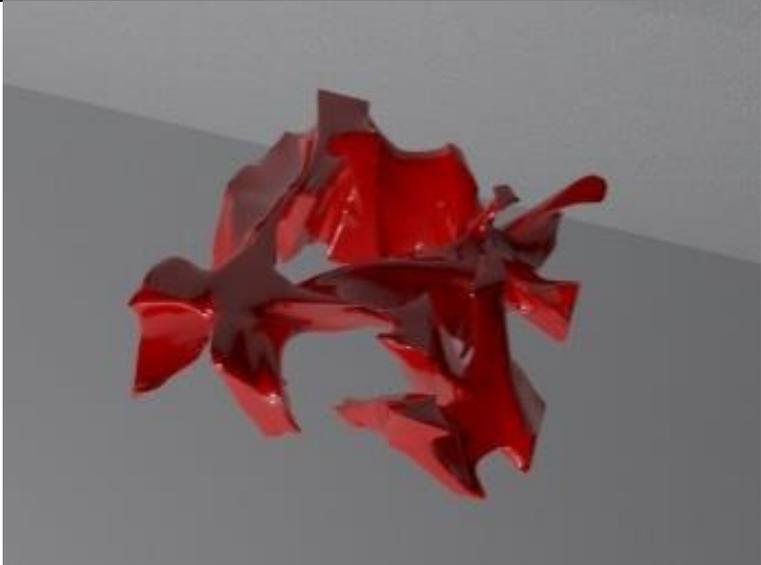
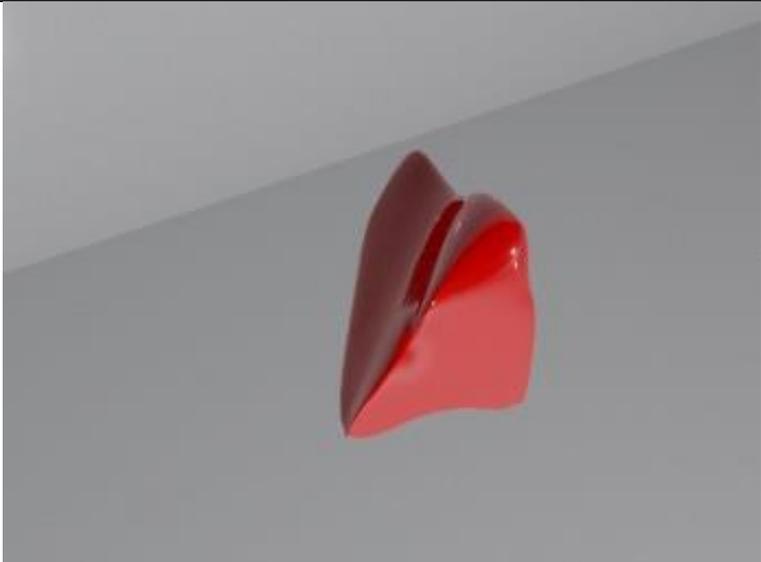
Таблица 3.1 – Объемы отделенных частей пористых структур тканых переплетений

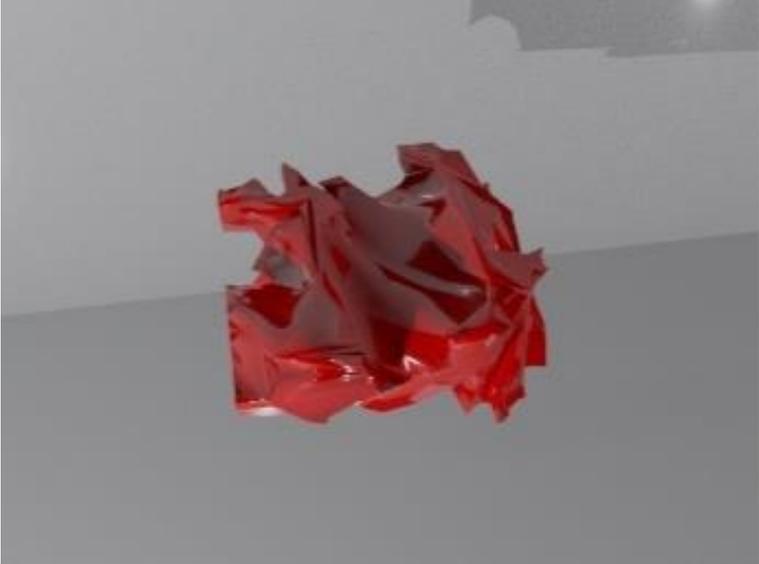
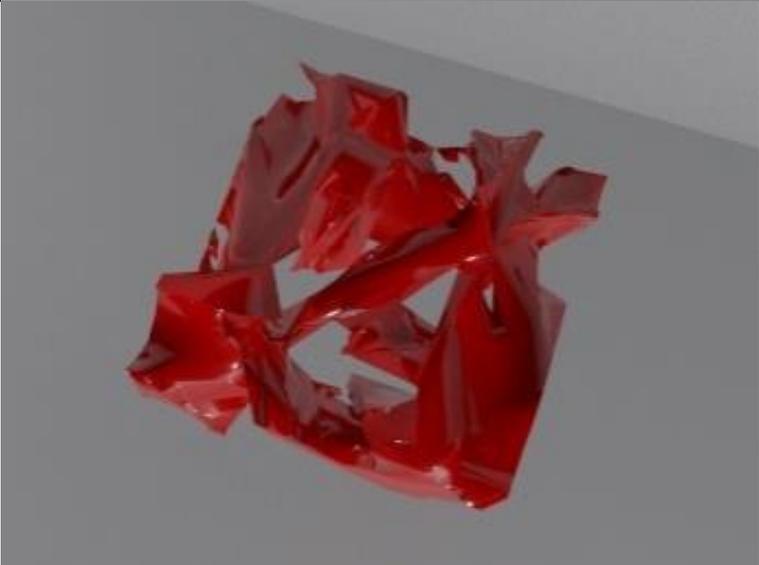
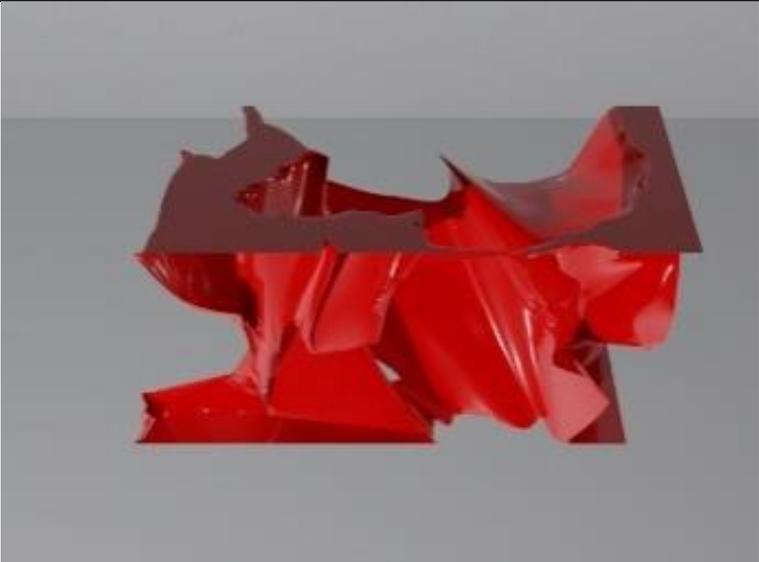
Плотняное переплетение. Объемы частей пористой структуры, мм ³	
	0,080

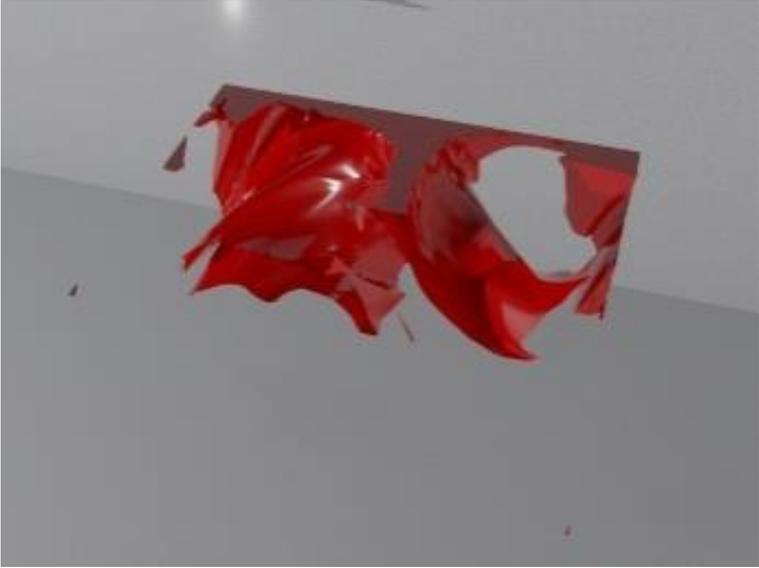
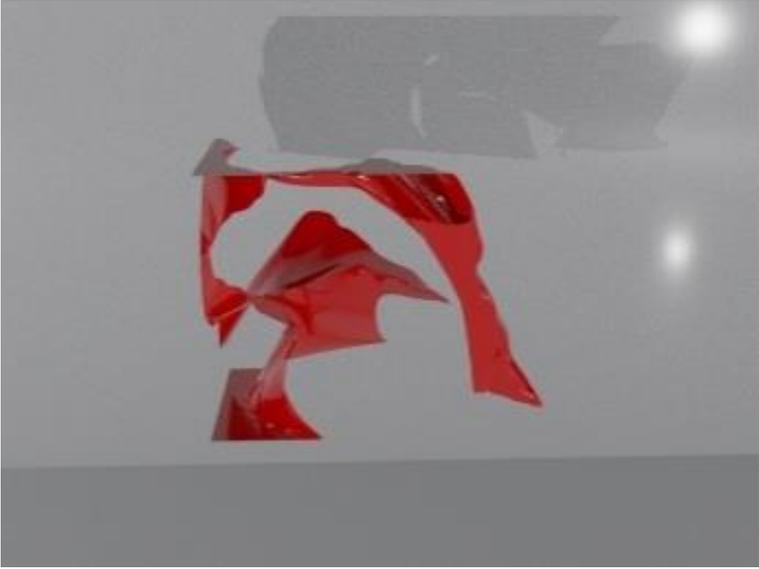
		0,095
		0,070
		0,910

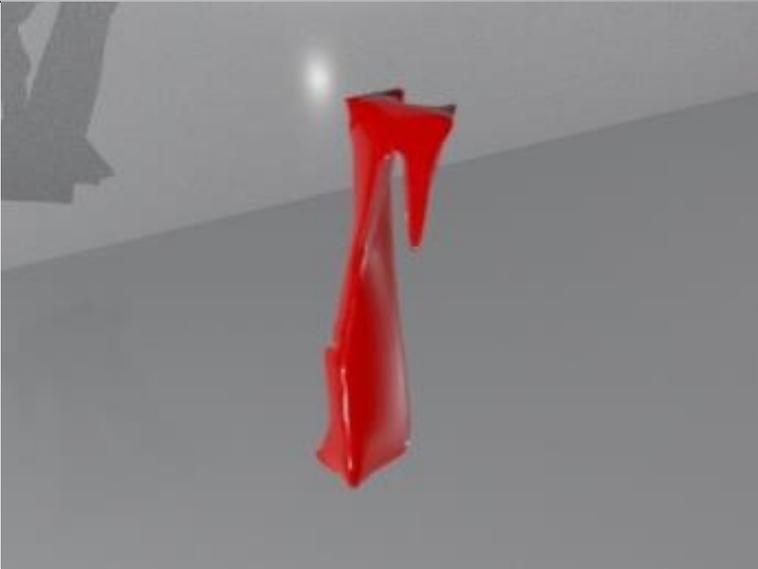
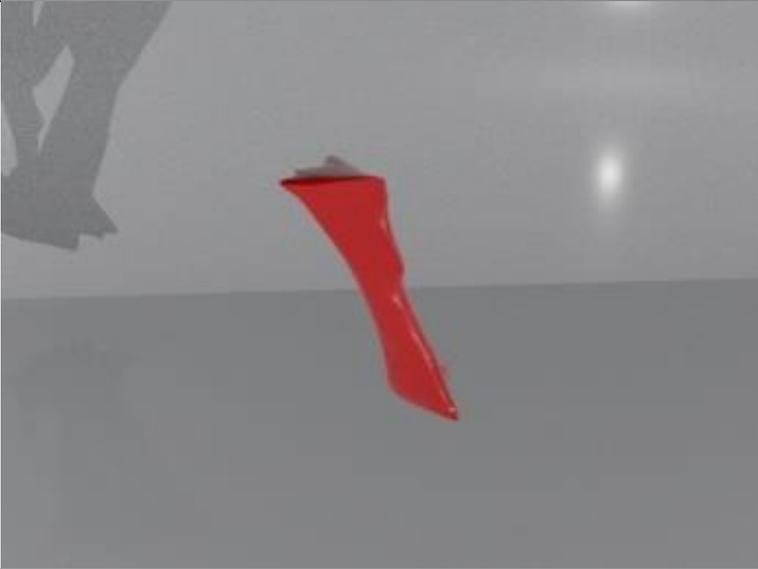
Сатиновое переплетение. Объемы частей пористой структуры, мм ³			
			0,002
			0,032
			0,996

			0,948
Атласное переплетение. Объемы частей пористой структуры, мм ³			
			0,023
			0,0365

			6,035
			3,501
Саржа. Объемы частей пористой структуры, мм ³			
			0,025

			6,417
			4,5825
Репсовое переплетение. Объемы частей пористой структуры, мм ³			
			0,032

		0,272
		0,146
		0,083

Усиленная саржа. Объемы частей пористой структуры, мм ³			
			0,090
			0,026
			0,046

			0,049
			3,007

Следует отметить, что частота нахождения данных элементов в зависимости от тканой структуры изменяется. В таблице проведены исключительно повторяющиеся элементы. Визуализация объектов выполнена с эффектом гладкой глянцевой поверхности для наглядности, т.к. за счет гладкости и блика четко просматриваются выступы и впадины, шероховатые и ровные поверхности.

Печать объекта на 3D-принтере – аддитивный процесс. Для печати образца требуется экспортировать модель в формат STL и назначить масштаб итогового объекта. Масштабирование малых объектов может выполняться при передаче образца принтеру в автоматическом режиме, когда встроенная программа анализа объекта находит оптимальные параметры печати. В этом случае итоговый размер

модели будет зависеть от наличия или отсутствия полых стенок и их толщина, размера площади прилегания к печатному столу, размер печатного стола (платформы), а также указанного качества сглаженности или детализации. При печати образца были выбраны автоматические оптимизированные настройки, одиночный цвет пластика и низкая полигональность образца, что позволило получить приемлемый результат в сжатые сроки. На рисунках ниже представлены трехмерная печатная модель части пористой структуры с указанием участков (рисунок 3.43), ее общий вид и проекции (рисунок 3.44).

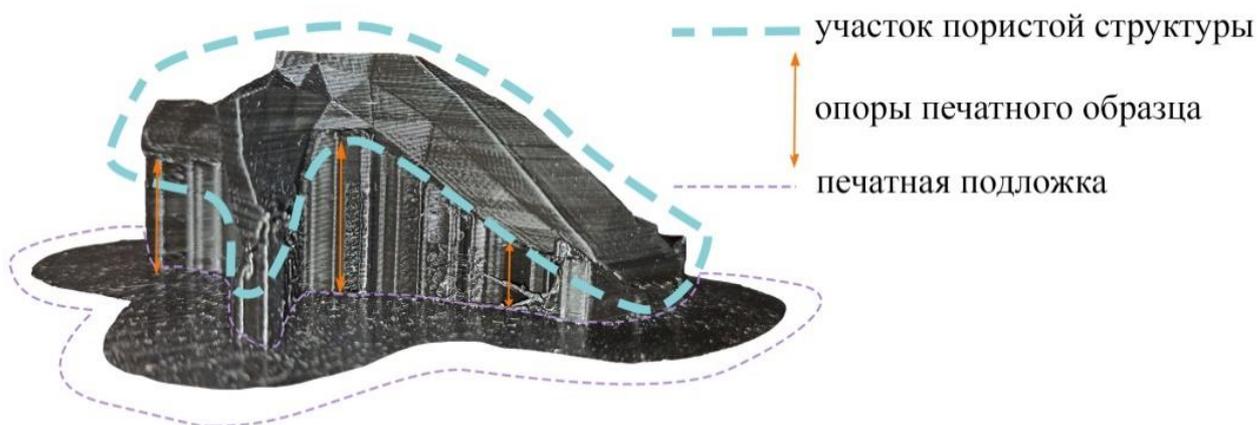


Рисунок 3.43 – Печатная модель и ее участков

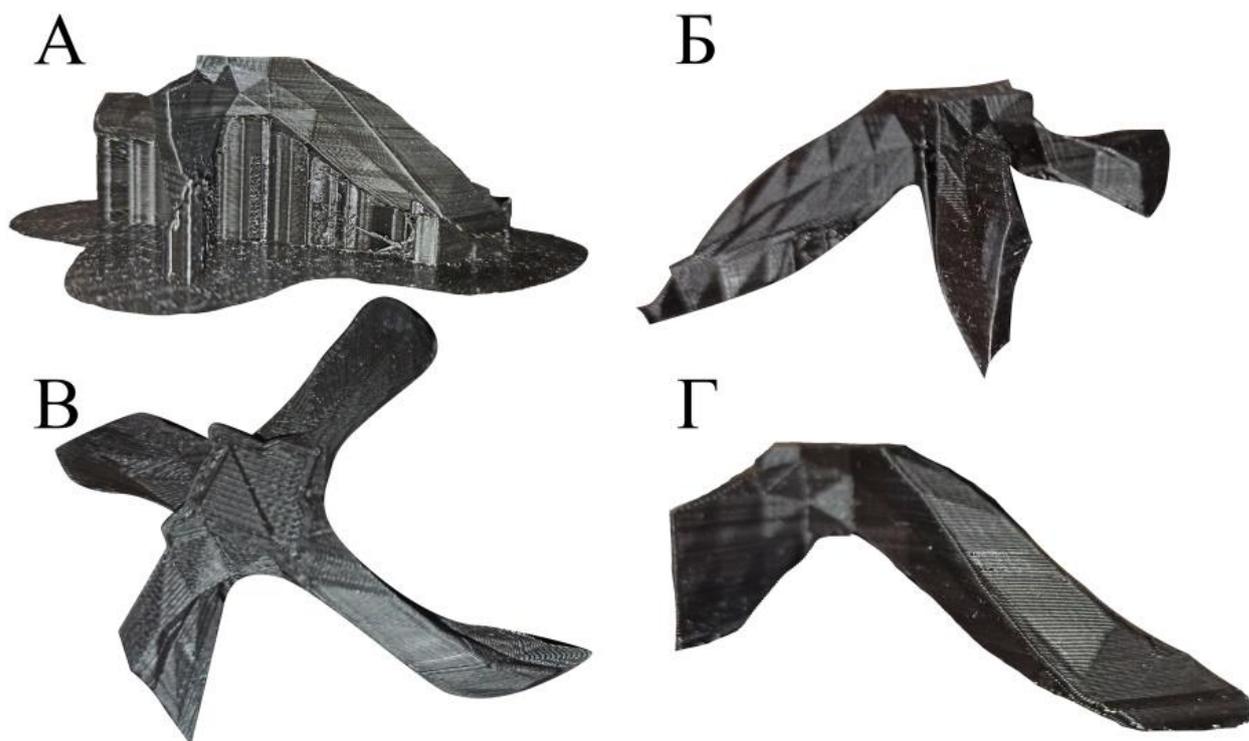


Рисунок 3.44 – Трехмерная печатная модель части пористой структуры: А – общий вид, Б и Г – виды сбоку, В – вид сверху.

3.4 Сравнение объемов пористых структур при равных условиях

Для сравнения объемов пористых структур необходимы равные условия (размер диаметра нити, расстояние между нитями и т.д.). Сравнение выполняется при наименьшем общем кратном для всех раппортов.

Для построенных моделей полотняного, сатинового, атласного переплетений, саржи и сложной саржи наименьшее общее кратное для раппортов равняется 280. Следовательно, объем пористых структур сравнивается для 140 раппортов полотняного переплетения, 70 раппортов саржи, 56 раппортов

сатинового переплетения, 35 раппортов усиленной саржи, 40 раппортов атласного переплетения.

Для исследования следующие виды переплетений: полотняное, саржевое и усиленная саржа. Наименьшее общее кратное (НОК) для указанных переплетений равняется 8. Результаты расчета отображены в таблице ниже (таблица 3.2).

Операция обрезки по указанному объему не имеет автоматизированных функций и требует ручной подготовки исследуемого образца. Поэтому в данный участок работы выполнен в среде Rhinoceros 3D, где введен габаритный контейнер (полый блок, имеющий ограничения по внешним стенкам). С его помощью можно сформировать область резки и получить образцы со считываемыми свойствами (рисунок 3.45).

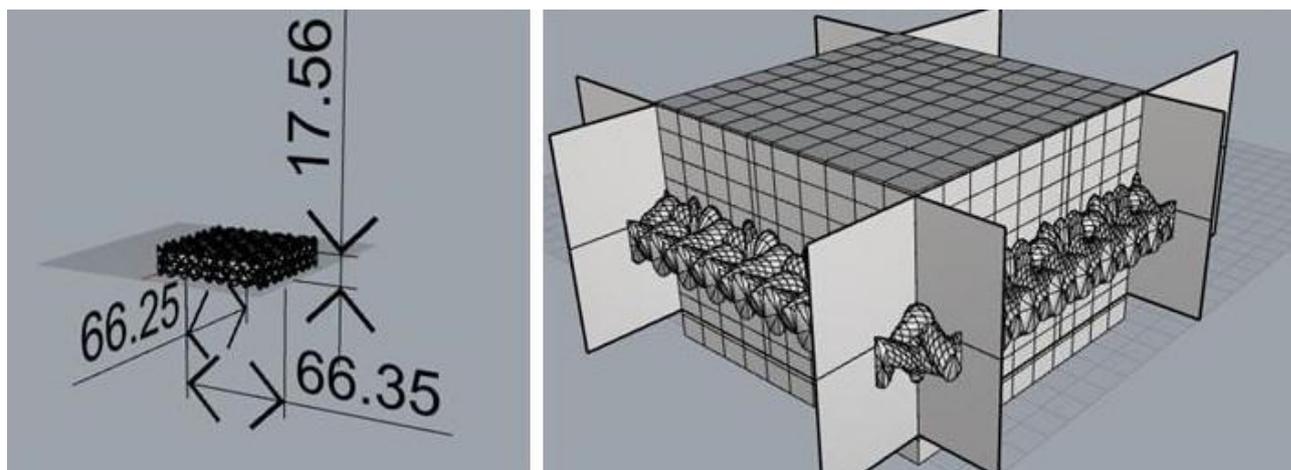


Рисунок 3.45 – Модель полотняного переплетения в момент построения габаритного контейнер, масштаб модели в программе 10:1

Из открытых для просмотра свойств обязательно доступен объем объекта. Т.к. на данном этапе отсутствует необходимость материализовывать пористую структуру, но требуется провести расчет ее объема, то искомое значение можно получить в результате разности объема габаритного контейнера и объема нитевого объекта (Приложение В).

Таблица 3.2 – Объем пор при равном наименьшем общем кратном раппортах

Переплетение	Число нитей в раппорте (по утку и основе) диаметр сечения нити 0,476 мм	Множитель при НОК=8	Вычисленный объем пор в образце, мм ³
Плотняное	2*2	4	40,2911483
Саржа	4*4	2	55,2256174
Усиленная саржа	8*8	1	70,5387383

Выводы по третьей главе

- 1) Установлено, что фигура сечения нити не влияет на возможности или ограничения дальнейших обработок и использования модели тканой структуры. Форма определяется заранее, т.к. в ходе нескольких преобразований представлений сетки, а затем и работы с топологией, не остается возможности вернуться к ее изменению.
- 2) Предложен метод преобразования пористого пространства тканого переплетения в материальную цифровую структуру с собственной геометрией и каркасной сеткой.
- 3) Получены результирующие визуализации построенных сцен. Выбор контрастного цвета участков пористых структур обусловлен техническими возможностями визуализации: цвет в совокупности с эффектами бликования позволяет более выразительно подчеркнуть геометрию объектов.
- 4) Получены геометрические данные для каждого исследуемого объекта. Они отражают доказанную зависимость: чем длиннее протяжки тем выше значение воздухопроницаемости.

Заключение

- 1) Разработан метод проектирования цифровых трехмерных моделей тканых структур.
- 2) Получены цифровые трехмерные модели тканей главных и производных видов переплетений (полотняного, атласного, репсового, сатинового переплетений, саржи и усиленной саржи).
- 3) Найдено решение материализации и организации каркасной сетки пористой структуры, предотвращены возможные ошибки в исследовании цифровых моделей структур из-за погрешностей внешнего представления. Геометрия отдельных элементов и всех пористых структур детализирована и дает более точное и подробное представление о пористости тканых переплетений.
- 4) Получены пористые структуры тканей с собственной геометрией каркаса и доступом к программному анализу свойств самостоятельных цифровых объектов.
- 5) Получены реальные формы и значения объема пор в тканях различных видов переплетений.
- 6) Доказана работоспособность метода при сравнительном анализе пористых структур полотняного переплетения, саржи и усиленной саржи: полученные модели пористых пространств соответствуют реальным представлениям об объектах. Выполнены визуализации тканых переплетений, пористых структур и их характерных элементов.

Список литературы

1. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Зайцева О.В., Вишневский В.В., Осипов Н.В. Современные ткани с мембранным покрытием // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №12.
2. Алахова С.С., Бодяло Н.Н., Шавнева О.В. Конструктивное решение модели бронежилета скрытого ношения // Материалы и технологии. 2021. №1.
3. Алибекова М.И., Костылева В.В., Новиков А.Н., Фирсов А.В. Современные технологии в проектировании обуви — Дизайн и технологии, 2017, №57(99). – с. 31— 35.
4. Архангельский Н.А. Товароведные исследования некоторых свойств тканей в зависимости от их строения. дис. МТИ, 1955 г.
5. Балыхин М.Г., Иванов В.В., Новиков А.Н. Методика проведения занятий по 3D—моделированию в ЦТПО МГУДТ — Дизайн и технологии, 2016 г., №51(93). – с. 122— 127.
6. Бешапошникова В. И., Климова Н. А., Ковалева Н. Е. Исследование влияния структуры на свойства объемных нетканых утеплителей одежды // Материалы и технологии. 2018. №2.
7. Бесхлебная С.Е. Разработка метода расчета объема сквозных пор в тканях главных и производных переплетений: автореф. дис. ... к-да техн. наук : 05.19.02 / Бесхлебная Светлана Евгеньевна ; МГТУ им. А.Н. Косыгина. – 2004. – 168 с.
8. Ботезат Л.А. Гигиена одежды : учебно-методический комплекс / Л.А. Ботезат; УО Витебский государственный университет им. П.М. Машерова Министерства образования Республики Беларусь. – Витебск : ВГТУ (университет), 2008 - 182 с. - ISBN 978-985-481-124-6.
9. Браславский В.А. Физико-химическая оценка гигиеничности некоторых текстильных материалов// Межвуз. сб.: Химия и химическая технология в текстильной промышленности. Л., 1978. 224 с.

10. Вагнер М., Хальгрэн М., Елкина И. И., Тарасов П. Е. и участники проекта «История моды на Шелковом пути (северо-западный Китай): археологический контекст, возраст, техника производства и реконструкция // *Archaeology in China and East Asia*, Volume 7, 2018. с. 18 – 38.
11. Галкин А.В. Разработка методологии исследования материалов для воссоздания исторического текстильного объекта.: дис. канд. техн. наук: 05.19.01: защищена 30.06.21: утв. 15.07.02. — М., 2021. — с.199
12. Гигиена и санитария. 1938, №11-12, с. 50-54.
13. Гиясова Д.Р. Изменение степени ворсистости тканей в процессе эксплуатации изделий из них // *Вестник ХГУ им. Н.Ф. Катанова*. 2019. №29.
14. ГОСТ Р 50516-93 Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран. Режим доступа: <https://rosstandart.msk.ru/gost/001.083.100/gost-r-50516-93/> (Дата обращения 01.02.2019)
15. ГОСТ 19.701-90 (ИСО 5807-85) Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9041994>
16. Груздева М.А., Кудрявцева Е.А., Букарева Л.А., Манцевич А.Ю. Инновации технологий 3d-печати в современном искусстве // *Вестник МГХПА*, № 1-2, 2020 . – с. 364-370
17. Еремина Н.С. Изучение закономерностей изменения физико -механических и гигиенических свойств тканей от их строения. Сборник рефератов ЦНИИХБИ, выпуск II, 1952.
18. Иванникова И.М. Изучение гигиенически важных свойств льняных, хлопчатобумажных и вискозных штапельных тканей для летней одежды. Дис. .к.т.н. - М, 1968. ЦНИИЛВ.
19. Измерительные приборы. Objective measuring // *Aft. Text.*-1998.- june july. - с. 31.- Англ.

20. Исследования IDC [Электронный ресурс] / TheDataAge 2025. Режим доступа: https://idcrussia.com/ru/research/published-reports?c_active=released_ReportsComponent&page=3 (Дата обращения 21.12.2018)
21. Казанский М.Ф., Луцык Г.В. Исследование пористой структуры и водоудерживающих свойств шерстяных тканей различной плотности. - Известия вузов. Технология легкой промышленности, 1979, №3, с. 22-26.
22. Калмыков П.Е. «Методы гигиенического исследования одежды». Медгиз.1960.
Калмыков П.Е. Определение воздухопроницаемости тканей // Гигиена и санитария. 1938. №11-12.
23. Каюмова А.В. Визуальное моделирование систем в StarUML: Учебное пособие/ А.В. Каюмова. Казань. – Казанский федеральный университет, 2013. – 104с.
24. Кондрацкий Э.В. Зависимость воздухопроницаемости тканей разной структуры от перепада давления. Дис.к.т.н. - М., 1972.
25. Кондрацкий Э.В. К вопросу о воздухопроницаемости тканей. - «Известия вузов. Технология текстильной промышленности», 1971, №3, с. 27-31
26. Корицкий К.И. Инженерное " проектирование текстильных материалов.- М., «Легкая индустрия», 1971, с. 87.
27. Краев И.Д., Сорокин А.Е., Нырцов А.В., Шипин Н.О., Краева А.А., Титкова Ю.М. Пенопласты, предназначенные для обеспечения поглощения акустических волн в широком диапазоне частот // Труды ВИАМ. 2018. №1 (61).
28. Каулен Г.Р., Порошин Н.С. Воздухопроницаемость, теплопроводность и паропроницаемость хлопчатобумажных тканей в зависимости от их структуры Иваново, 1957.
29. Колесников П.Н., Иванов А.Н., Киселев А.М., Хамматова Э.А. Компьютерные трехмерные модели текстильных материалов полотняного

- переплетения // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternye-trehmernye-modeli-tekstilnyh-materialov-polotnyanogo-perepleteniya> (дата обращения: 11.11.2020)
30. Колеров Д.К. Гидромеханика поровой среды. «Химическая промышленность», 1959, №2.
31. Кудрявцева Е.А. Проектирование жизненного цикла исследовательского процесса в науке на основе трудов профессоров РГУ им. А.Н. Косыгина // Сб. публ. науч. журн. «Chronos» (уровень стандарта, академический уровень). – М : Научный журнал «Chronos», 2019. – 29-32 с.
32. Кудрявцева Е.А., Кузьмин А.Г., Новиков А.Н., Фирсов А.В. 3d-fashion-проект корсета, как элемента современного костюма // Дизайн и технологии № 79 (121), 2020. – с. 112-118.
33. Кудрявцева Е.А., Груздева М.А., Павлов В.С. Инновации современных информационных технологий и графического дизайна в искусстве, образовании и текстильной промышленности // Инновационное развитие современной науки Сборник XII Международной научно-практической конференции. 2019. С. 50-55.
34. Кудрявцева Е.А., Новиков А.Н., Фирсов А.В., Юхин С.С. Об итогах реализации проекта цифровой реставрации узорных тканей средствами информационных технологий // Сборник стендовых докладов молодых ученых и студентов: Международный Косыгинский Форум (29-30 октября 2019 г.). – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2019. – 103-104 с.
35. Кудрявцева Е.А., Сухова А.П., Ничуразова А.А., Новиков А.Н. Интерпретация фрагментов исторического костюма с помощью современных аддитивных технологий // Всероссийская научно-практическая конференция «ДИСК-2018»: сборник материалов Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – с. 75-77.

36. Кудрявцева Е.А., Сухова А.П., Ничуразова А.А. Реновация исторической накидки эпохи «Модерн» средствами современных аддитивных технологий. // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности: сборник материалов Международной научной студенческой конференции. Часть 3. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2019. – с. 120-122.
37. Кудрявцева Е.А., Юхин С.С., Кононова О.С. Цифровая реставрация и компьютерное моделирование узорных тканей средствами информационных технологий [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, №4 (2019) Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5839> (Дата обращения 25.09.2019)
38. Кулаев А.С., Арсентьев Д.А. Игровое моделирование или весь процесс создания 3d-модели для игры // Вестник науки. 2020. №1 (22).
39. Красильникова Г.А. Автоматизация инженерно-графических работ: AutoCAD 2000, КОМПАС-ГРАФИК 5.5, MiniCAD 5.1 / Г. А Красильникова, В. В. Самсонов, С. М. Тарелкин. - СПб: Питер, 2000
40. Малецкая С.В. Проектирование крупноузорчатых тканей с помощью компьютера // Текстильная промышленность. - 1998. - №62, - с.33-34.
41. Маркин А.Д. Прототипирование промышленного светодиодного светильника методом аддитивных технологий [Электронный ресурс] // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности: сборник материалов Всероссийской научной студенческой конференции. Часть 3. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – С. 187.
42. Матвеев С.Н. Изображение тканей из полимерных материалов при компьютерном моделировании одежды // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №19. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/izobrazhenie-tkaney-iz-polimernyh-materialov-pri-kompyuternom-modelirovanii-odezhdy> (дата обращения: 11.11.2020).

43. Материалы текстильные. Метод определения воздухопроницаемости. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Государственный стандарт Российской Федерации. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200026106?marker=7D20K3> (Дата обращения 21.12.2018)
44. Николаев С.Д., Мартынова А.А., Юхин С.С., Власова Н.А. Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве. М., 2003 – 336 с.
45. Павлова М.И. К вопросу проектирования ткани. Научно-исследовательские труды, МТИ, т. 12, 1954.- с. 147.
46. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное вычисления. Т. II: М.: Интеграл-Пресс, 1998. - 544 с.
47. Порошин Н.С. Исследование воздухопроницаемости суровых хлопчатобумажных тканей в зависимости от их структуры. -Л 1955 Дис.к.т.н.
48. Прибор для определения воздухопроницаемости тканей. Авт. свид. СССР №88037.
49. Пугачевский Г.Ф. Воздухопроницаемость рубашечных тканей. «Текстильная промышленность», 1964, №2, с. 72-75.
50. Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200028629>
51. Рыклин Д.Б., Сяотун Т., Крушевич К.А. Разработка программы для расчета показателей драпируемости тканей на основе данных 3d-сканирования // Вестник ВГТУ. 2020. №1 (38). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmy-dlya-rascheta-pokazateley-drapiruемости-tkaney-na-osnove-dannyh-3d-skanirovaniya> (дата обращения: 11.11.2020).

52. Сайденев Г.Б. Методы расчета воздухопроницаемости тканей в зависимости от их строения. Дис.к.т.н. -М., 1965.
53. Сайденев Г.Б. К обоснованию формулы воздухопроницаемости ткани. «Известия вузов. Технология текстильной промышленности», 1964, №1, с. 9
54. Сайденев Г.Б. Зависимость воздухопроницаемости ткани от ее строения. «Известия вузов. Технология текстильной промышленности», 1964, №3, с.32-35.
55. Севостьянов А.Г. Методы и средства исследовательских процессов в текстильной промышленности. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007 – 648 с.
56. Селиванов Г.И. Строение однослойных элементов ткани. В сб.: Научно-исследовательские труды МТИ. т IX. 1954. с. 15-25.
57. Сердюкова Е.А., Москвин А.Ю. Компьютерное моделирование исторических методов декорирования одежды // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна № 1' 2019, с. 44 – 49.
58. Складчиков В.П. О коэффициенте поверхностного заполнения тканей,- «Текстильная промышленность», 1964, №6, с. 32 – 36.
59. Складчиков В.П. Строение и качество тканей,- М., Легкая и пищевая промышленность, 1984.
60. Скорикова А.И. Проектирование полшерстяных плательных тканей оптимального строения. Дис.к.т.н. - М., 1981.
61. Слостина ГЛ. и Сумарукова Р.И. Аналитическое описание параметров смещенных сарж и использование ЭВМ для их построения / Известия вузов. Технология текстильной промышленности.- 1998,- №1-с.40-42.
62. Соловьев А.Н. Определение пористости тканей. Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 1965, №3.
63. Сурнина Н.Ф. Строение и физические свойства драпа. В сб.: Научно-исследовательские труды МТИ. т IX. 1954, с. 50-63.

- 64.Сыс В.В. Оценка распределения пропитывающего состава в структуре армирующей ткани // Вестник Херсонского национального технического университета. 2014. №1 (48).
- 65.Топология в 3d-моделировании // Наука и образование [сайт]. – 2019. Режим доступа: <http://opusmgau.ru/index.php/see> (Дата обращения 05.06.2019)
- 66.Туланов Ш.Э., Прозорова О.В, Валиева З.Ф. Особенности выбора ткани для специальной одежды медицинских работников // Universum: технические науки. 2021. №12-3 (93).
- 67.Успаских С.М., Куриленко О.Ю. Проектирование жаккардовых тканей с заданными свойствами. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Текстиль-96», МГТА имени А.Н. Косыгина. – 1996. – с. 127.
- 68.Файзрахманов Р. А., Бакунов Р. Р., Мехоношин А. С. Создание трехмерных моделей для системы визуализации тренажерного комплекса // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2011. №5.
- 69.Федоров Н.С. Метод определения теоретической воздухопроницаемости. Текстильная промышленность, 1944, №1
- 70.Фирсов А.В. Теоретические и прикладные аспекты разработки автоматизированных систем управления проектированием тканых полотен: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Фирсов Андрей Валентинович ; МГТУ им. А.Н. Косыгина. – 2007. – 351 с.
- 71.Флоринский Б. Воздухопроницаемость тканей. Легкая промышленность, 1937, №5, с.73-84.
- 72.Флоринский Б. О скорости прохождения воздушного потока через ткани. Журнал технической физики. Т. VI, вып. 5, 1936.
- 73.Чарковский Александр Владимирович, Алексеев Денис Анатольевич. Создание 3D-моделей базовых структур трикотажа // Вестник ВГТУ. 2018.

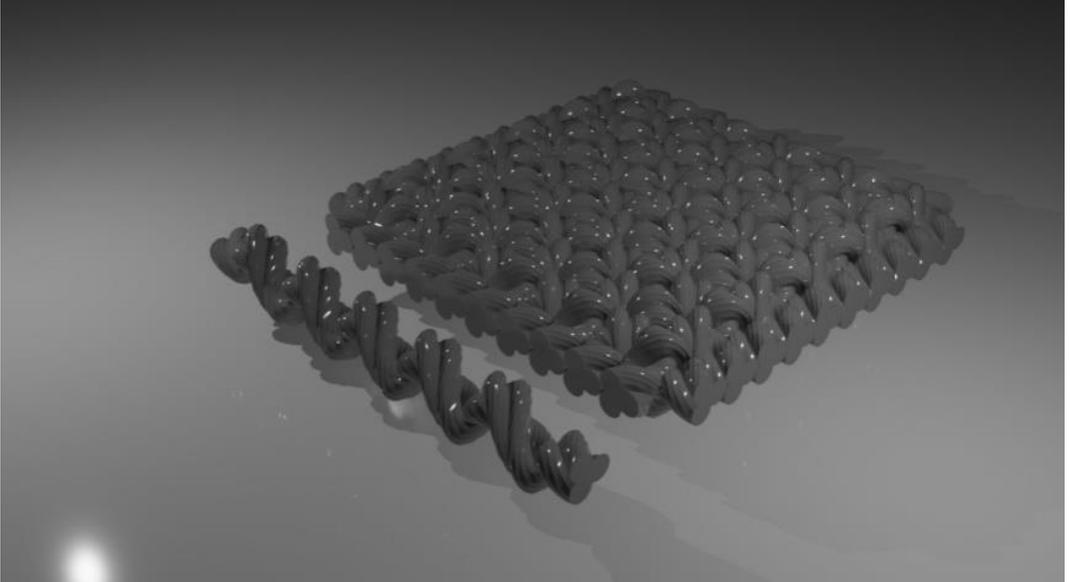
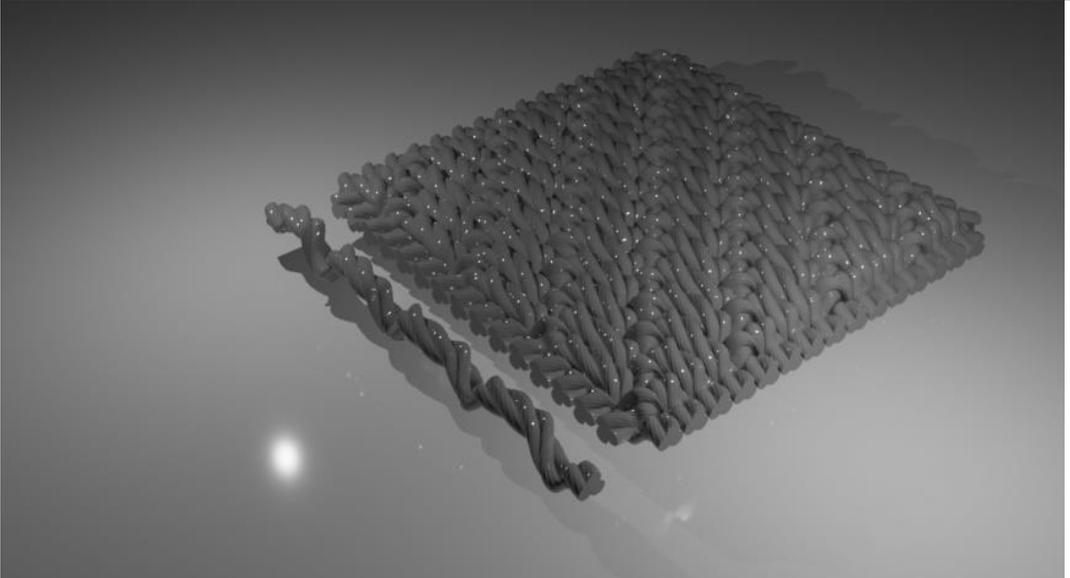
- №2 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozдание-3d-modeley-bazovyh-struktur-trikotazha> (дата обращения: 11.11.2020).
- 74.Шарабидзе М.Р. Изучение физико-механических характеристик специального текстиля с лечебными свойствами // Проблемы Науки. 2018. №2 (122).
- 75.Шейдеггер А.Е. Физика течения жидкостей через пористые среды.- М., Гостоптехиздат, 1960.
- 76.Юхин С.С. Ткань для кислотозащитных рукавиц. Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 1995, №1, с. 114.
- 77.Юхина Е.А. Определение оптимальных параметров строения и условий изготовления хлопколавсановых тканей : диссертация кандидата технических наук : 05.19.03. - Москва, 1984. - 179 с.
- 78.Яблонский С.В. Введение в дискретную математику: учеб. пособ .для вузов. – М.: Высшая школа. – 2008. – с. 384
- 79.Яскевич Я.С., Лукашевич В.К. Философия и методология науки: Учеб.пособие для магистрантов и аспирантов [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5403915/> (Дата обращения 21.12.2018)
80. 3D Today [Электронный ресурс] // Энциклопедия 3D-печати, 21 июня 2017. Режим доступа: <http://3dtoday.ru/info/about/> (Дата обращения: 10.08.2018)
- 81.A Photogrammetry-based Framework to Facilitate image-based modeling and automatic camera tracking. Sebastian Bullinger, Christoph Bodensteiner, Michael Arens. Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 1: GRAPP, 106-112, 2021
- 82.Alianna Maguire, Neethu Pottackal, M. Saadi, Muhammad M Rahman, Pulickel M Ajayan, Additive manufacturing of polymer-based structures by extrusion technologies, Oxford Open Materials Science, Volume 1, Issue 1, 2021,

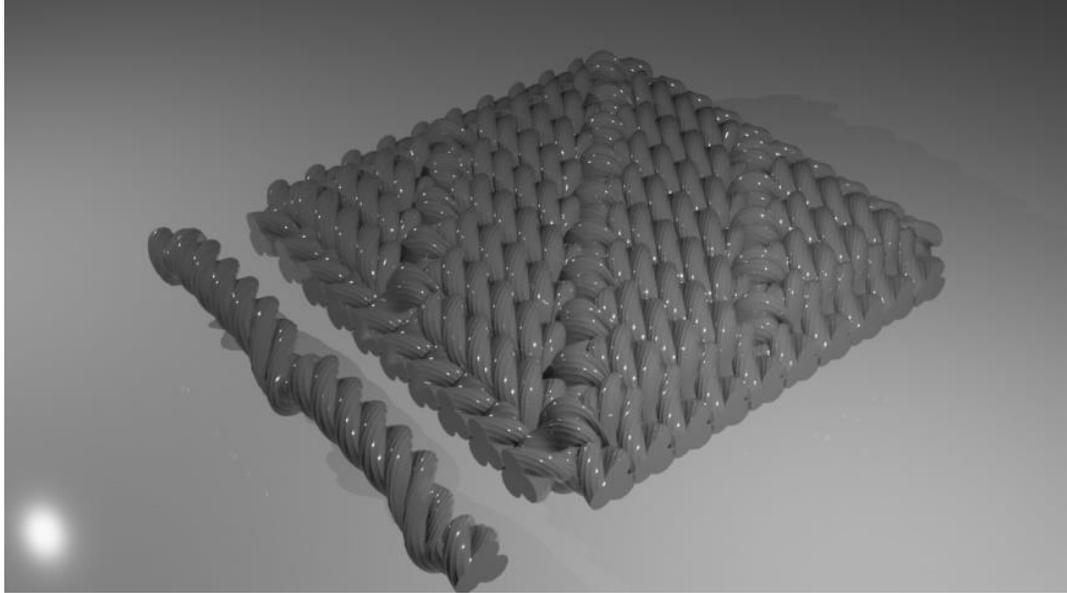
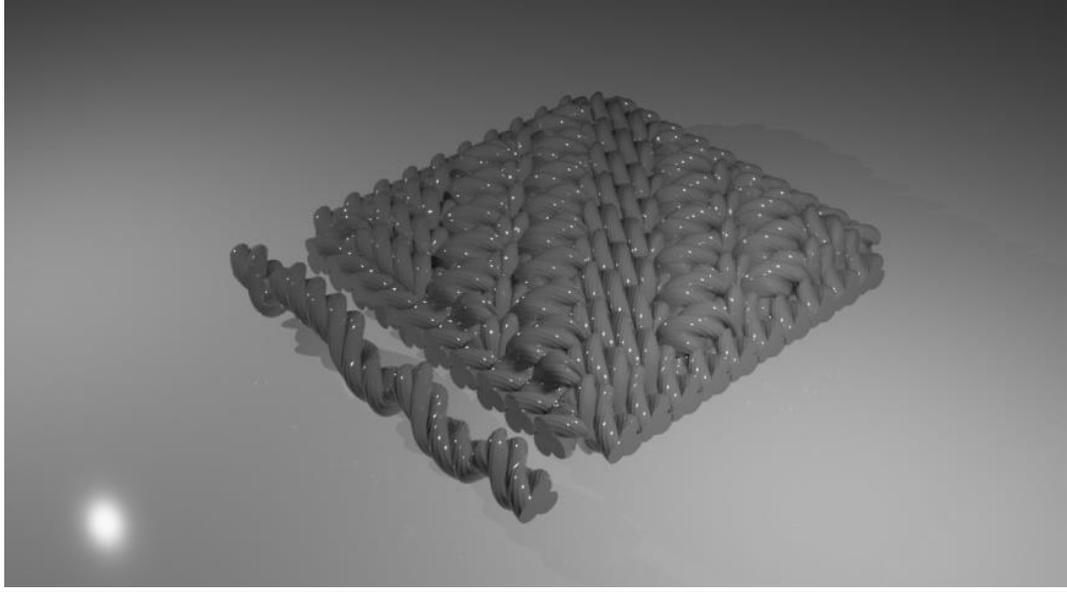
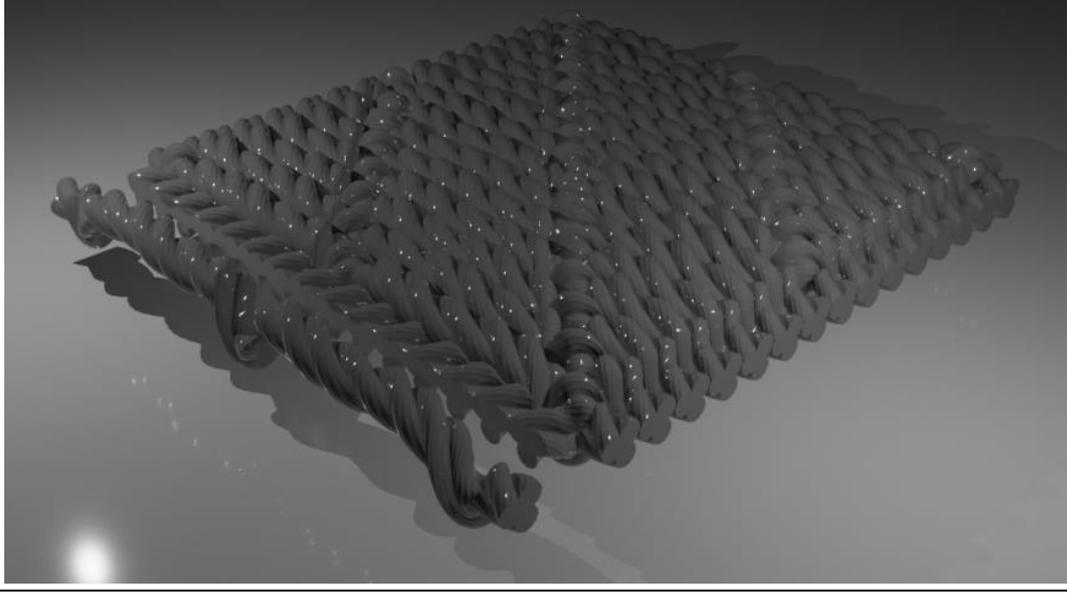
- itaa004, Режим доступа: <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itaa004> (Дата обращения 23.10.2020)
- 83.Blender. Blender Manual. Режим доступа: <https://www.blender.org/> (Дата обращения 25.12.2018)
- 84.Espalin D. et al. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Т. 72. – №. 5. – С. 963-978.
- 85.Gibson I. et al. Additive manufacturing technologies. – Cham, Switzerland : Springer, 2021. – Т. 17.
- 86.H. J. Aida,R. Nadlene,M.T. Mastura,L. Yusriah,D. SivakumarORCID Icon &R. A. Ilyas. Natural fibre filament for Fused Deposition Modelling (FDM): a review. 2020 Режим доступа: <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itaa004> (Дата обращения 22.09.2021)
- 87.H. Wheeler «Hydraulics and Pneumatics», 15, 84-85, 1962.
- 88.ISO. Textiles—Physiological effects—Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test) (ISO 11092:2014). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.
- 89.Karunakaravel Karuppasamy, Nancy Obuchowski, Comparison of Fit for Sealed and Loose-Fitting Surgical Masks and N95 Filtering Facepiece Respirators, Annals of Work Exposures and Health, Volume 65, Issue 4, May 2021, Pages 463–474. Режим доступа: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa125>(Дата обращения 18.01.2021)
- 90.Kim L Johnson, From Fuzz to Fiber: Identification of Genes Involved in Cotton Fiber Elongation, Plant Physiology, Volume 183, Issue 1, May 2020, Pages 23–24, Режим доступа: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00233> (Дата обращения 08.05.2020)
- 91.Ligon S. C. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing //Chemical reviews. – 2017. – Т. 117. – №. 15. – С. 10212-10290.

92. Ning F. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Т. 80. – С. 369-378.
93. Patil A., Patel A., Purohit R. An overview of polymeric materials for automotive applications // *Materials today: proceedings*. – 2017. – Т. 4. – №. 2. – С. 3807-3815.
94. Rahim T. N. A. T., Abdullah A. M., Md Akil H. Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites // *Polymer Reviews*. – 2019. – Т. 59. – №. 4. – С. 589-624. Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583724.2019.1597883> (Дата обращения 22.04.2019)
95. T. Spahiu, S. Fafenrot, N. Grimmelsmann, E. Piperi, E. Shehi and A. Ehrmann. 17th World Textile Conference AUTEX 2017- Textiles - Shaping the Future. Varying fabric drape by 3D-imprinted patterns for garment design. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 254 (2017) 172023
96. Tiwary CS, Kishore S, Sarkar S, Mahapatra DR, Ajayan PM, Chattopadhyay K. Morphogenesis and mechanostabilization of complex natural and 3D printed shapes. *Sci Adv*. 2015 May 15;1(4):e1400052. doi: 10.1126/sciadv.1400052
Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26601170/> (Дата обращения 23.10.2020)
97. Thomas W. Bement, Ania Mitros, Rebecca Lau, Timothy A. Sipkens, Jocelyn Songer, Heidi Alexander, Devon Ostrom, Hamed Nikookar, Steven. N. Rogak
Filtration and breathability of nonwoven fabrics used in washable masks // *Medical Physics*. Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03505>
(Дата обращения: 07.02.2022)
98. Weng Z. et al. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing // *Materials & Design*. – 2016. – Т. 102. – С. 276-283.

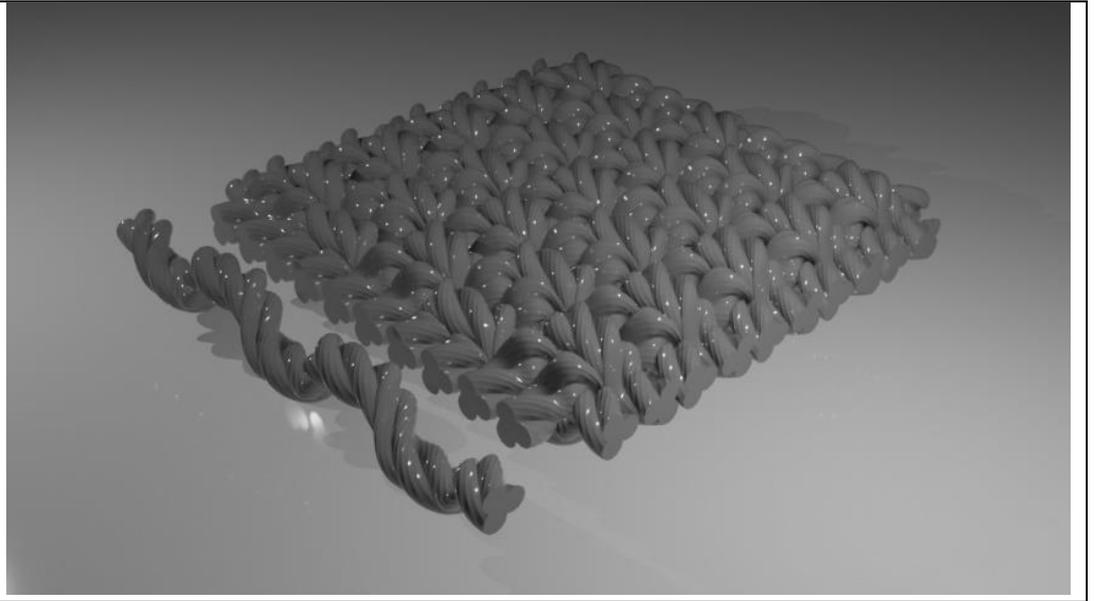
99. What does IBM Rational Rhapsody Developer do [Электронный ресурс] / IBM.
Режим доступа: <http://www-01.ibm.com/software/awdtools/developer/rose/>
(Дата обращения 25.12.2018)

Приложение А
Результаты рендеров переплетений

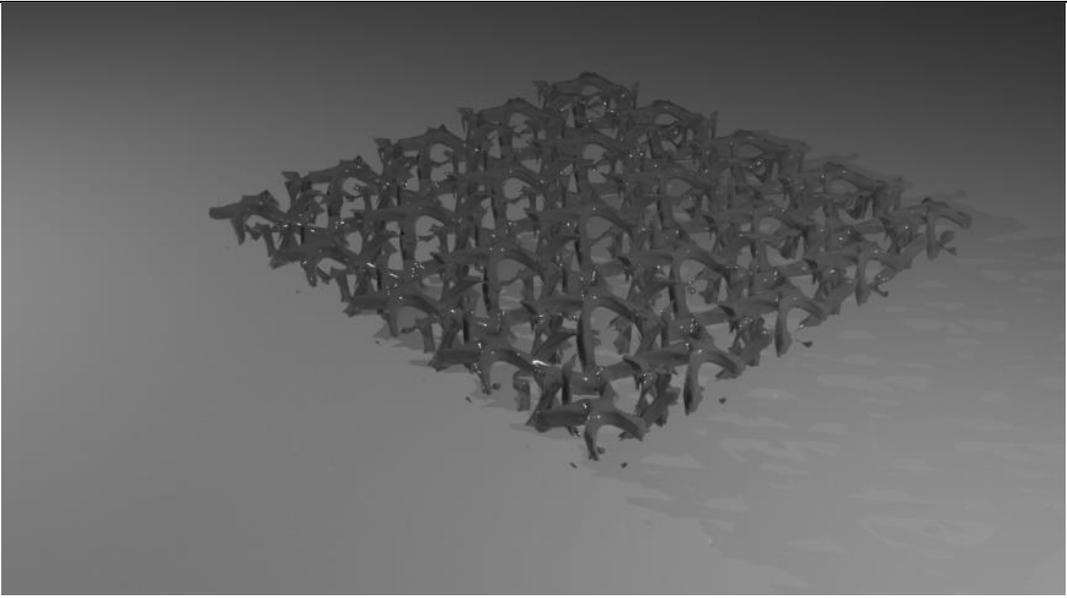
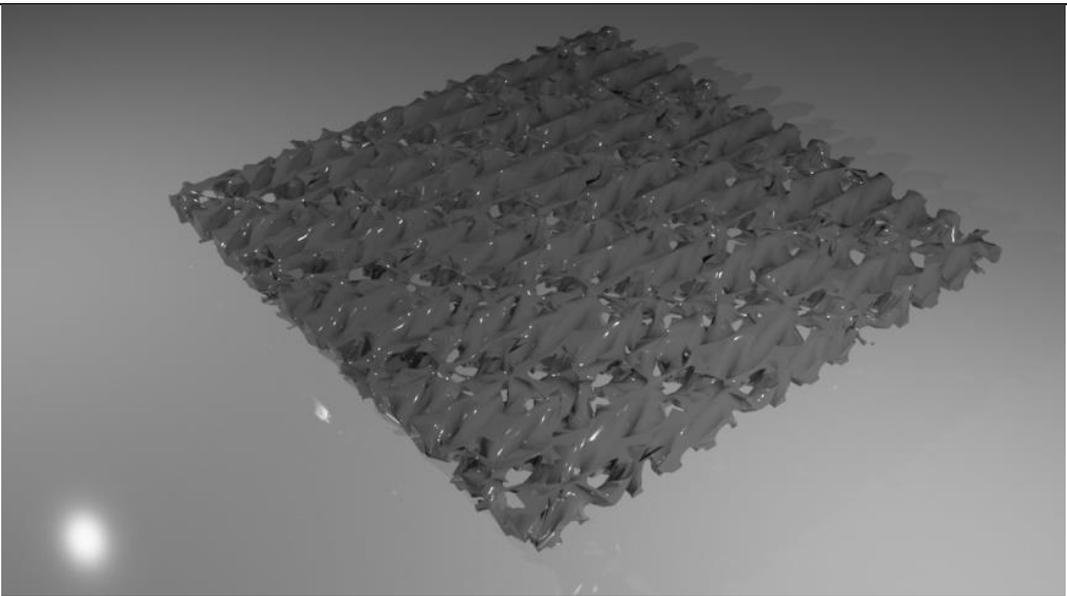
Переплетение	Рендеры переплетений
Плотняное	 A 3D rendered image of a flatweave fabric sample. The fabric is shown as a rectangular piece with a fringed edge on the left side. The texture is a simple, regular weave pattern. The rendering is in grayscale, showing highlights and shadows that define the three-dimensional structure of the threads.
Саржа	 A 3D rendered image of a twill fabric sample. Similar to the flatweave, it is a rectangular piece with a fringed edge on the left. The twill weave pattern is clearly visible, characterized by diagonal ridges. The grayscale rendering emphasizes the depth and texture of the fabric's structure.

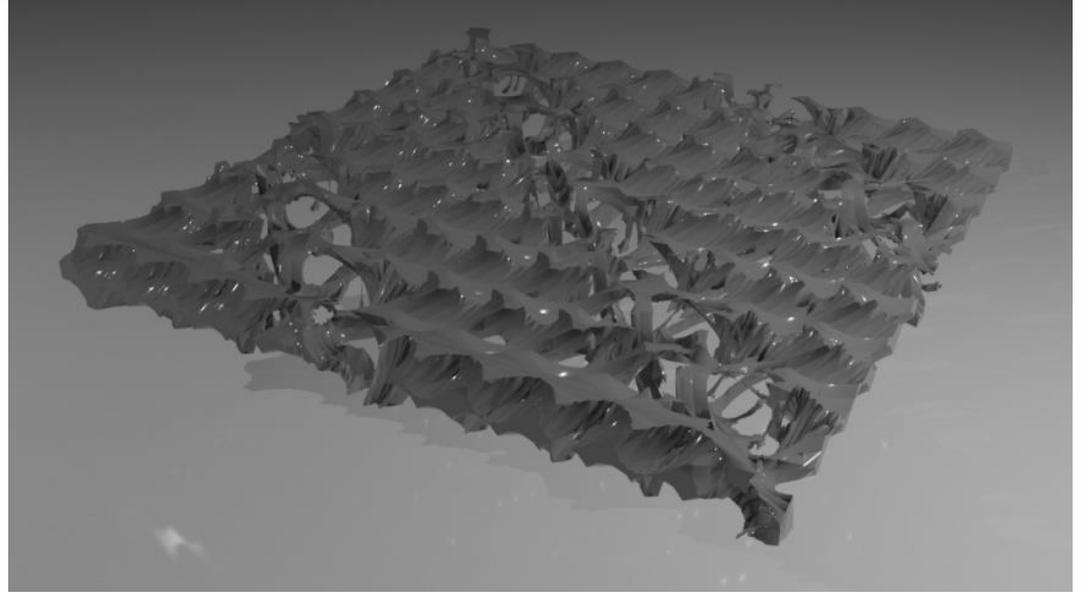
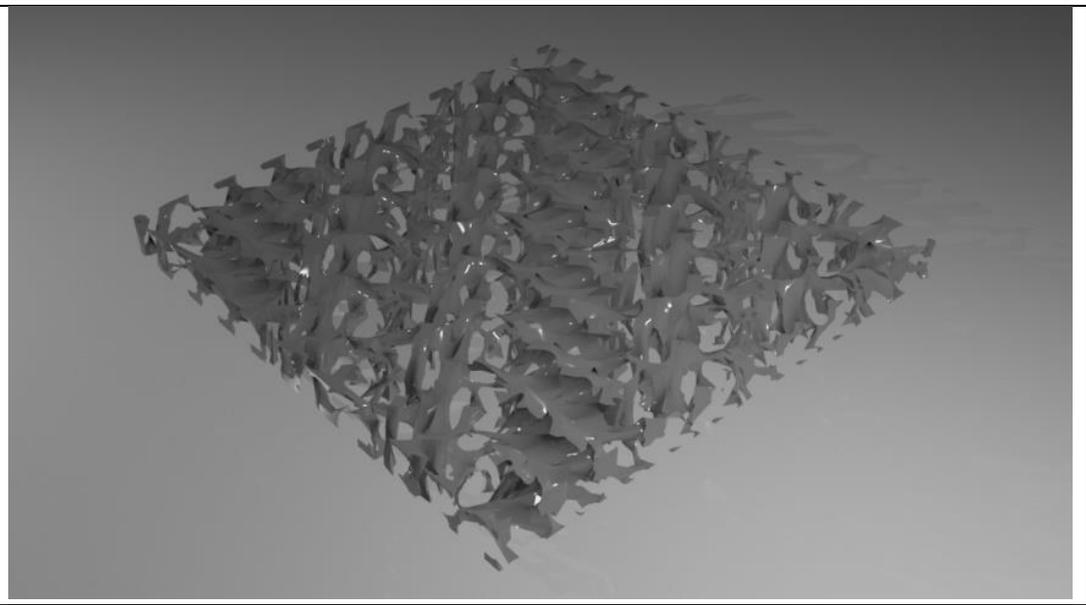
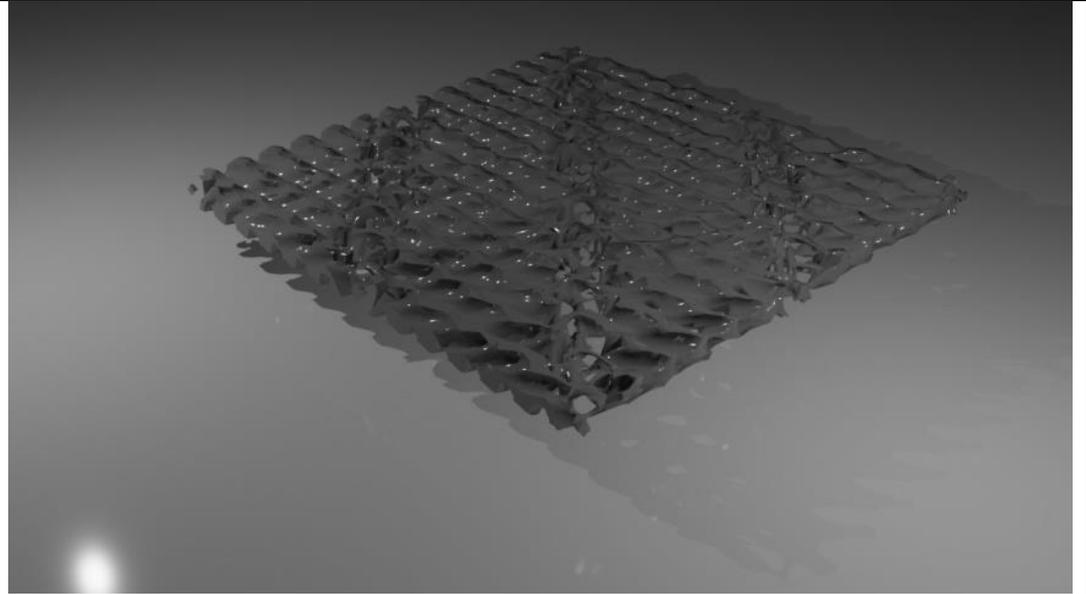
<p>Сатиновое</p>	 A 3D rendering of a square piece of satin fabric, characterized by its smooth, lustrous surface and diagonal ribbing. A thick, twisted cord is draped over the top-left corner of the fabric. The scene is set against a dark background with a light source creating a bright highlight on the fabric's surface.
<p>Усиленная саржа</p>	 A 3D rendering of a square piece of reinforced twill fabric, showing a distinct diagonal ribbing pattern. A thick, twisted cord is draped over the top-left corner. The lighting highlights the texture and sheen of the fabric against a dark background.
<p>Атласное</p>	 A 3D rendering of a square piece of atlas fabric, featuring a very fine and dense diagonal ribbing. A thick, twisted cord is draped over the top-left corner. The fabric's surface is highly reflective, creating a strong highlight from the light source.

Репсовое

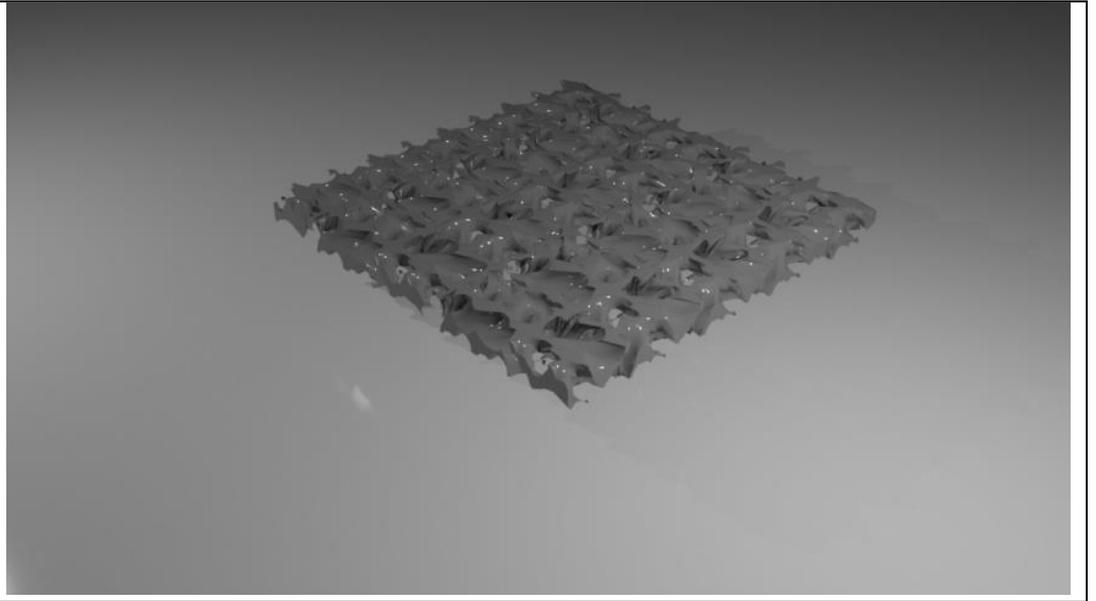


Приложение Б
Результаты рендеров пористых структур тканых переплетений

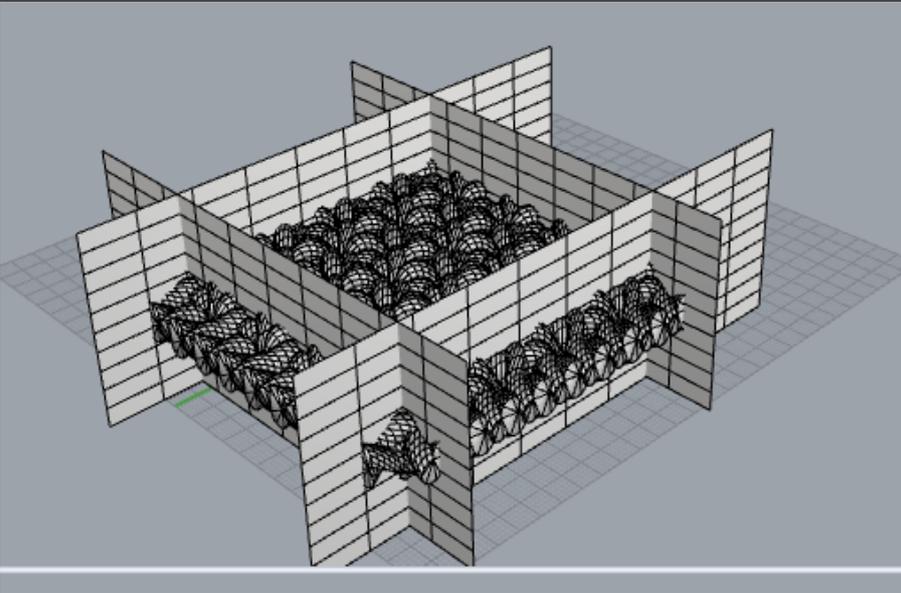
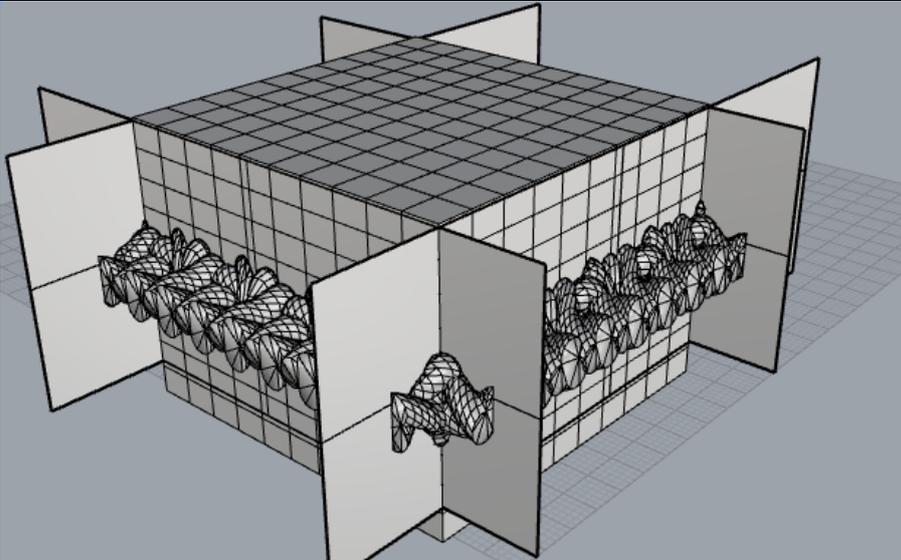
Переплетение	Рендеры пористых структур тканых переплетений
Плотняное	 A 3D rendering of a porous structure representing a plain weave. The structure is a square grid of interconnected, slightly irregular, dark grey fibers. The fibers are oriented in a way that creates a mesh-like appearance with significant open space between them. The structure is set against a dark grey background and casts a soft shadow on the surface below.
Саржа	 A 3D rendering of a porous structure representing a twill weave. The structure is a square grid of interconnected, slightly irregular, dark grey fibers. The fibers are oriented in a way that creates a mesh-like appearance with significant open space between them. The structure is set against a dark grey background and casts a soft shadow on the surface below.

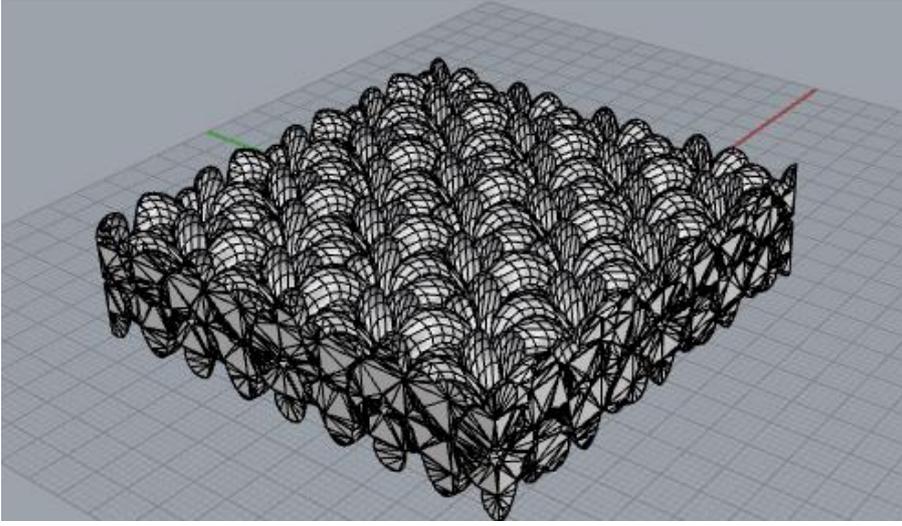
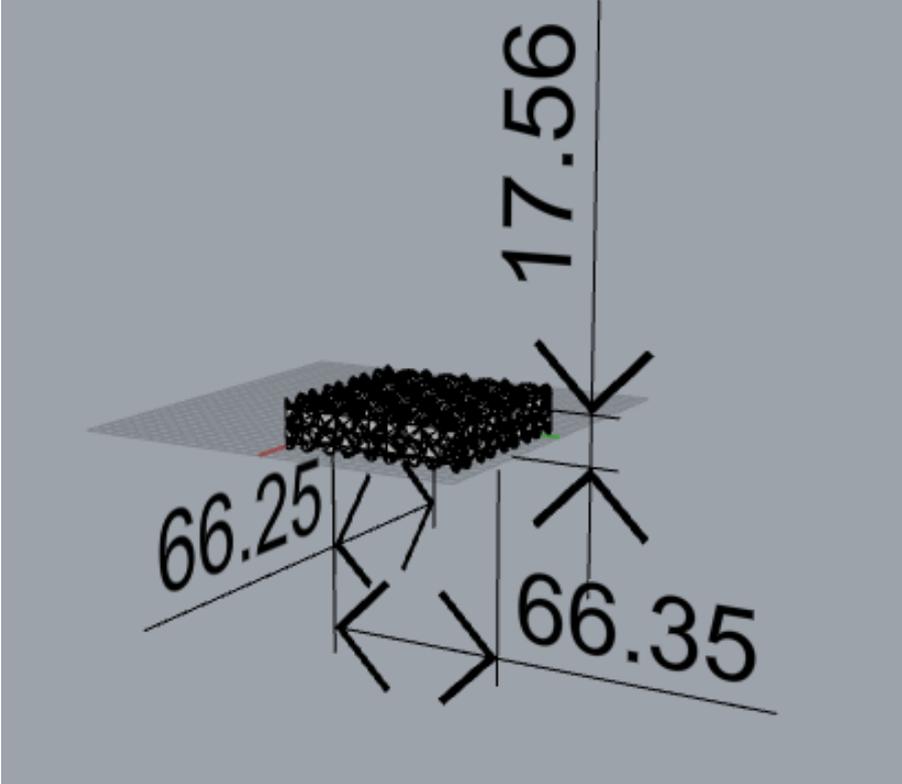
<p>Сатиновое</p>	
<p>Усиленная саржа</p>	
<p>Атласное</p>	

Репсовое



Приложение В
Расчет объемов пористых структур при равных условиях (на примере
полотняного переплетения)

Порядок действия	Описание	Визуализация
1	Ограничение плоскостями исследуемого объекта (8 на 8 нитей).	 A 3D visualization showing a porous, mesh-like structure contained within a 3x3x3 grid of vertical and horizontal planes. The structure is composed of interconnected, rounded, porous elements. The grid is formed by 8 planes in each direction, creating a 3x3x3 arrangement of cells. The structure is centered within this grid.
2	Построение габаритного куба (контейнера).	 A 3D visualization showing the same porous structure from the previous step, now enclosed within a larger wireframe cube. The cube is composed of a grid of lines, representing the bounding box or container for the structure. The structure is centered within the cube.

3	<p>Объем образца (получен через меню функции «Свойства»): 36,8971242 мм³.</p>	
	<p>Объем габаритного контейнера: 6,625 x 6,635 x 1,756 = 77,1882725мм³ .</p>	 <p>Масштаб визуализации 10:1</p>
	<p>Объем пористой структуры: 77,1882725 - 36,8971242 = 40,2911483мм³</p>	<p>Без визуализации</p>

Приложение Г

Диаграммное представление метода получения тканых структур

Предложенный метод проектирования моделей тканых структур и порядок цифровой материализации пор трехмерных тканых структур наглядно представлены с помощью диаграмм деятельности (рисунок Г.1, рисунок Г.2).

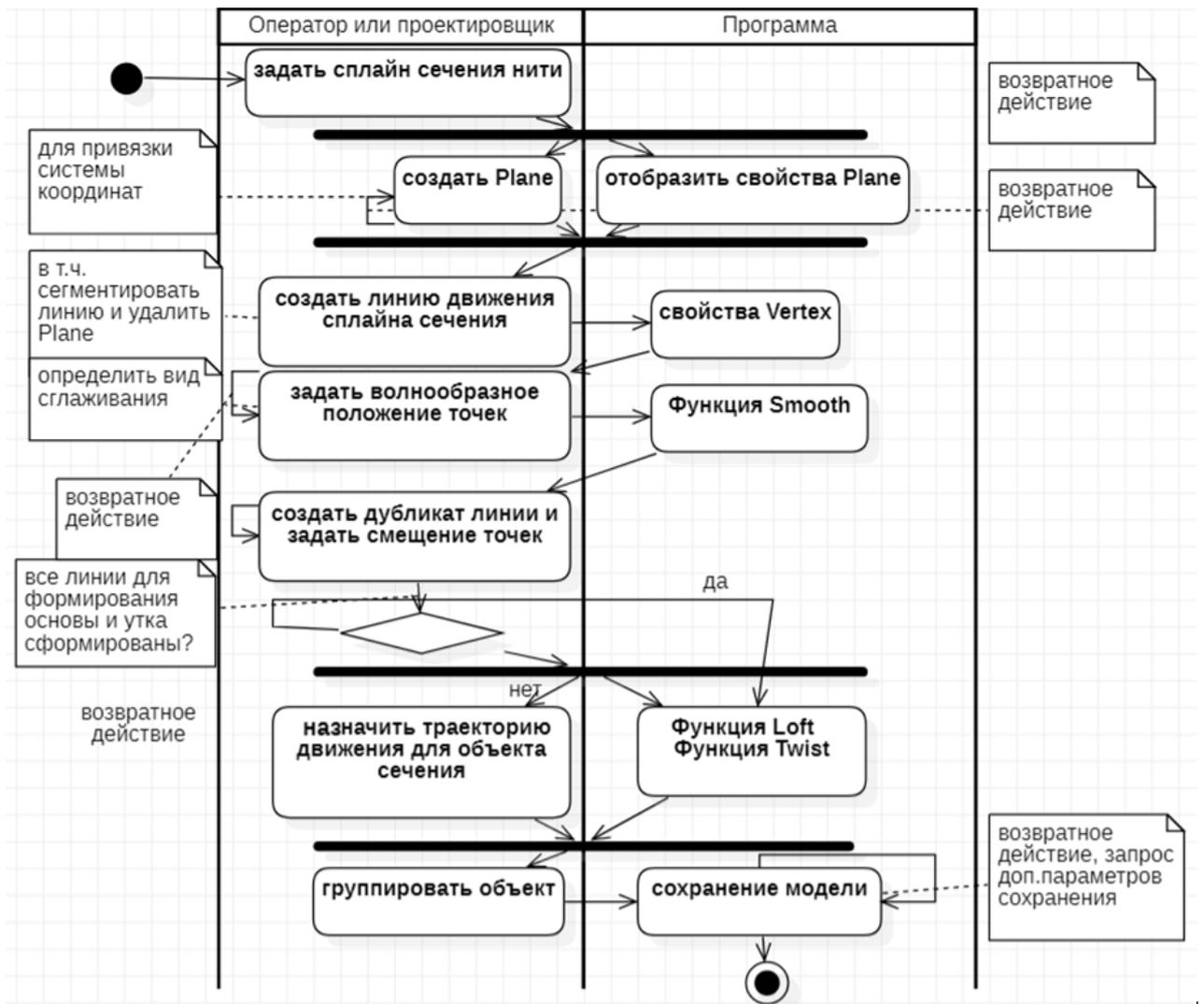


Рисунок Г.1 – Диаграмма деятельности: визуальная модель метода цифрового проектирования тканых структур

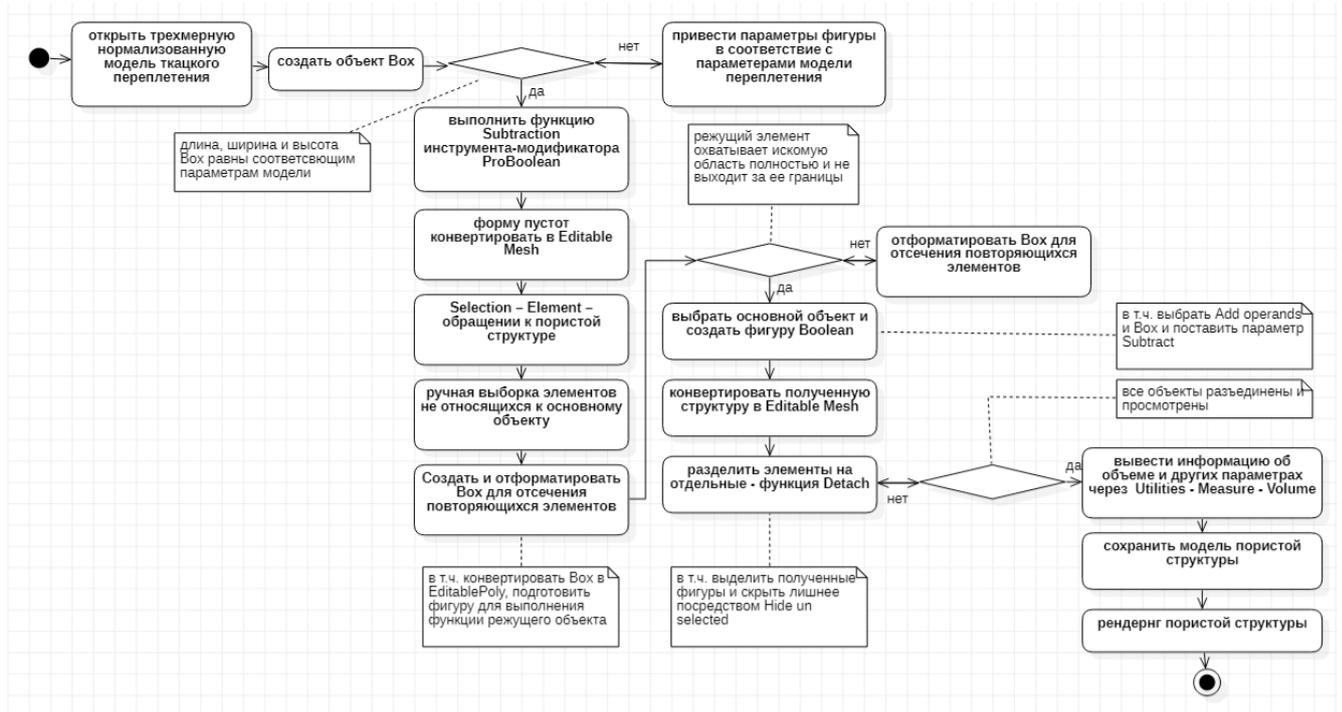


Рисунок Г.2 – Диаграмма деятельности: визуальная модель цифрового метода материализации пор тканых структур